



**Ângela Sofia  
Albuquerque Ferreira**

**Estudo da zona costeira de Prado, Bahia, Brasil**





**Ângela Sofia  
Albuquerque Ferreira**

**Estudo da zona costeira de Prado, Bahia, Brasil**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Carlos Daniel Borges Coelho, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro



Dedico este trabalho a todos que não puderam estar presentes neste momento da minha vida



## **o júri**

presidente

**Prof. Doutor Joaquim Miguel Gonçalves Macedo**  
professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

**Doutora Sandra Marisa Silva Costa**  
investigadora da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

**Prof. Doutor Carlos Daniel Borges Coelho**  
professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro





## **agradecimentos**

A realização deste trabalho não seria possível sem o apoio incondicional de várias pessoas na minha vida, a quem dedico este pequeno espaço como forma de agradecimento por tudo o que fizeram por mim.

Aos meus pais, por tornarem este caminho possível, incentivando-me sempre a ir mais longe do que eu acreditava poder alcançar.

À minha irmã, pelo apoio e pela companhia em todos os momentos desde o início desta etapa.

À minha família, por toda a ajuda, apoio e afeto.

À Vânia, pela amizade e confiança, acreditando sempre no que poderia alcançar, mesmo estando distante.

Ao Mafarrico, pela paciência e compreensão nos momentos mais difíceis, pelo apoio e incentivo para atingir e nunca desistir dos meus objetivos, e principalmente pela amizade e afeto, sempre que necessário.

Ao meu orientador, Professor Carlos Coelho, pela disponibilidade e ajuda, pelo empenho e compreensão, pela paciência e incentivo, durante a realização deste trabalho, através das rigorosas correções e dos conselhos prestados, contribuindo de uma forma significativa para o resultado final.

À investigadora, Márcia Lima, pelo auxílio prestado, que apesar de ter sido de pequena duração, foi de grande importância.

A todos os novos e velhos amigos, pelo apoio e pelos momentos de distração, também necessários para a realização deste trabalho.

A todos... MUITO OBRIGADO!



## palavras-chave

Erosão costeira, dinâmica sedimentar, modelação numérica, linha de costa, intervenções de defesa costeira

## resumo

A erosão costeira é um fenómeno influenciado por ações naturais e/ou antropogénicas, que resulta de um balanço sedimentar negativo, em que existe um recuo médio da linha de costa ao longo de um determinado espaço de tempo. No presente trabalho será exposto um caso de erosão costeira na zona de Prado, Brasil, onde houve uma rotura da linha de costa, originando uma nova ligação entre o rio existente na região e o oceano. O objetivo desta dissertação foi caracterizar a região e estudar uma solução de defesa costeira, capaz de mitigar o processo de erosão que tem se registado na zona costeira de Prado, originando diversos prejuízos a nível social, económico e ambiental.

A dissertação é composta pela caracterização do local em estudo, envolvendo diversos aspetos, como a população existente na região, o clima de agitação e a dinâmica costeira, considerados elementos relevantes para determinar a causa da rotura da linha de costa na zona de Prado, procedendo-se também à caracterização do rio Jucuruçu, que desagua no litoral em estudo. Toda a caracterização pretendeu suportar as decisões para adotar a solução mais adequada ao problema em questão, tendo em conta vários fatores essenciais para o dimensionamento de uma intervenção de defesa costeira.

Após a caracterização do local e recolha de elementos foi possível proceder à modelação de cenários de intervenção de defesa costeira com recurso ao modelo LTC (*Long Term Configuration*), tendo sido escolhida a opção de um esporão, para permitir a acumulação de areia a barlar da zona erodida. O esporão foi depois dimensionado com recurso ao modelo XD-Coast, sendo apresentada a solução preliminar proposta para o local.

É de salientar que o resultado deste trabalho é um estudo preliminar, mas com o intuito de transmitir um caso real que tem vindo a prejudicar as linhas de costa de todo o mundo e de alertar para a preservação e proteção destas, pois muitas das modificações que se verificam atualmente ocorrem devido à ação humana, englobando a falta de planeamento e de gestão das zonas costeiras.



**keywords**

Coastal erosion, sediments dynamics, numerical modeling, shoreline, coastal defense interventions

**abstract**

Coastal erosion is a phenomenon influenced by natural and/or anthropogenic actions, resulting from a negative sediment balance, where there is an average retreat from the shoreline on a defined time period. The present work exposes a case of coastal erosion in Prado, located in Brazil littoral, where there was a rupture of the shoreline, resulting in a new inlet between the existing river in the region and the ocean. The purpose of this dissertation was to characterize the region and perform a preliminary study of a coastal defense solution, mitigating the erosion process that has been taking place in the coastal zone of Prado, causing several social, economic and environmental damages.

The document is composed by the characterization of the study site, involving several aspects, such as the existing population in the region, the wave climate and the coastal dynamics, considered relevant elements to determine the cause of shoreline erosion in Prado, also proceeding to the characterization of the Jucuruçu river, which flows into the coast under analysis. All the performed characterization intended to support the decision making, helping to adopt the most appropriate solution to the erosion problem, considering several essential factors to the design of a coastal defense structure.

After the data collection for the study site characterization, it was possible to numerically model different coastal defense intervention scenarios by applying the LTC (Long Term Configuration) model, and the option of a groin was chosen to allow the updrift sand accumulation, protecting the eroded area. The groin was then designed, applying the XD-Coast model, allowing to present the preliminary solution proposed for the site.

It should be noticed that the result of this work is a preliminary study, but representing a real case, that has commonly been damaging the shorelines all over the world. This work allows to alert to the preservation and protection of worldwide littorals, since many of the modifications that are presently occurring are due to human action, including the lack of planning and management of coastal zones.



**ÍNDICE**

|   |    |
|---|----|
| <b>1. Introdução</b>                              | 3  |
| 1.1. Enquadramento                                | 3  |
| 1.2. Objetivos                                    | 7  |
| 1.3. Estrutura do relatório                       | 8  |
| <b>2. Caracterização da Zona de Estudo</b>        | 13 |
| 2.1. Localização                                  | 13 |
| 2.2. População e Ocupação                         | 13 |
| 2.3. Agitação Marítima                            | 14 |
| 2.3.1. Marés                                      | 14 |
| 2.3.2. Ondas                                      | 16 |
| 2.4. Geomorfologia, Vegetação e Dinâmica Costeira | 18 |
| 2.5. Topografia e Batimetria                      | 24 |
| <b>3. Rio Jucuruçu</b>                            | 29 |
| 3.1. Localização                                  | 29 |
| 3.2. Bacia do Rio Jucuruçu                        | 29 |
| 3.2.1. Geologia                                   | 30 |
| 3.2.2. Vegetação                                  | 30 |
| 3.2.3. Caudais                                    | 31 |
| <b>4. Modelo LTC</b>                              | 37 |
| 4.1. LTC  | 37 |
| 4.2. Cenário Base                                 | 38 |
| 4.2.1. Domínio de Cálculo                         | 38 |
| 4.2.2. Calibração                                 | 40 |
| <b>5. Cenários Testados</b>                       | 49 |
| 5.1. Definição dos Cenários                       | 49 |
| 5.1.1. Esporão (L)                                | 49 |
| 5.1.2. Obra Longitudinal Aderente (OLA)           | 51 |
| 5.1.3. Esporão + Obra Longitudinal Aderente       | 52 |
| 5.1.4. Alimentação Pontual (AP)                   | 53 |
| 5.1.5. Alimentação Artificial (AA)                | 54 |
| 5.2. Resultados                                   | 55 |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 5.3.      | Discussão.....                                      | 59        |
| <b>6.</b> | <b>Dimensionamento de Intervenções .....</b>        | <b>63</b> |
| 6.1.      | XD-COAST (Xpress Design of COAstal STructures)..... | 63        |
| 6.2.      | Dimensionamento.....                                | 64        |
| 6.3.      | Peso dos Blocos do Manto Resistente.....            | 65        |
| 6.3.1.    | Fórmula de Hudson .....                             | 66        |
| 6.3.2.    | Fórmula de van der Meer .....                       | 66        |
| 6.4.      | Material do Manto Resistente .....                  | 67        |
| 6.5.      | Pré-dimensionamento.....                            | 69        |
| 6.5.1.    | Parâmetros Considerados .....                       | 71        |
| <b>7.</b> | <b>Considerações Finais.....</b>                    | <b>81</b> |
| 7.1.      | Conclusões .....                                    | 81        |
| 7.2.      | Desenvolvimentos Futuros.....                       | 83        |
|           | <b>Referências Bibliográficas.....</b>              | <b>89</b> |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Localização da zona em estudo (Wikipédia, 2006) .....  | 3  |
| Figura 2: Rutura da linha de costa em Prado (Google Earth).....  | 4  |
| Figura 3: Cronologia da linha de costa de Prado (Google Earth).....  | 6  |
| Figura 4: Evolução Populacional (IBGE, 2010) .....   | 14 |
| Figura 5: Amplitude das marés ao longo do litoral da Bahia (Muehe e Nicolodi, 2017).....   | 15 |
| Figura 6: Caracterização de uma maré semi-diurna típica (Coelho, 2005).....  | 15 |
| Figura 7: Localização de boias ao longo do litoral da Bahia (GOSS-BRASIL, 2017) .....  | 16 |
| Figura 8: Altura das ondas significativas da boia “Praia do Forte”, entre 2014 e 2017 (GOOS-BRASIL, 2017) .....                                  | 17 |
| Figura 9: Frequência e orientação das ondas na boia “Praia do Forte”, entre 2014 e 2017 (GOOS-BRASIL, 2017) .....                                | 17 |
| Figura 10: Geomorfologia litoral de Prado (Muehe e Nicolodi., 2017).....   | 18 |
| Figura 11: Tipos de relevo do litoral do Prado.....  | 19 |
| Figura 12: Vegetação no município de Prado .....   | 20 |
| Figura 13: Deriva litoral na costa do Prado e padrão de sedimentos em 1987 e em 1996 (CBPM/CPRM, 2000).....                                      | 23 |
| Figura 14: Topografia do Extremo Sul de Bahia e batimetria da zona costeira de Prado.....  | 24 |
| Figura 15: Carta Náutica (CHM, 2018).....  | 25 |
| Figura 16: Localização do Rio Jucuruçu (esquerda) e respetiva bacia hidrográfica (direita) (Sarmiento-Soares <i>et al.</i> , 2009).....          | 29 |
| Figura 17: Estações de medição dos caudais da bacia do rio Jucuruçu, cujos números correspondem às estações descritas no texto (ANA, 2017) ..... | 31 |
| Figura 18: Caudais anuais correspondentes às estações referidas ao longo do rio Jucuruçu (ANA, 2017) .....                                       | 32 |
| Figura 19: Caudais e precipitações médias mensais medidas nas estações descritas no texto (ANA, 2017) .....                                      | 33 |
| Figura 20: Altura de onda projetada para a simulação de 10 anos, com base em registos passados   | 38 |
| Figura 21: Linha de costa dividida em 8 perfis com um espaçamento de 3 km, no sentido da deriva litoral de Prado .....                           | 39 |
| Figura 22: Resultado da simulação de esporões, ao fim de 10 anos .....   | 50 |
| Figura 23: Resultado da simulação de obras longitudinais aderentes, ao fim de 10 anos.....   | 51 |
| Figura 24: Resultado da simulação de esporões com obras longitudinais aderentes, ao fim de 10 anos .....   | 52 |
| Figura 25: Resultado da simulação de alimentações pontuais, ao fim de 10 anos .....  | 53 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 26: Resultado da simulação de alimentações artificiais, ao fim de 10 anos .....                      | 54 |
| Figura 27: Resultados de todos os cenários simulados, ao fim de 10 anos .....                               | 56 |
| Figura 28: Localização do esporão adotado, localizado a 400 m da seção de estudo .....                      | 63 |
| Figura 29: Esporão na praia do Furadouro (Irmãos Cavaco, 2006-2008) .....                                   | 68 |
| Figura 30: Formulações consideradas no programa XD-Coast.....   | 69 |
| Figura 31: Janelas do programa XD-Coast .....   | 72 |
| Figura 32: Resultados do XD-Coast para diferentes inclinações de talude.....                                | 75 |
| Figura 33: Esquema da planta e do corte do esporão selecionado como possível solução na zona de Prado ..... | 77 |

**ÍNDICE DE TABELAS**

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1: Resultados da calibração, para os coeficientes $k$ de 0.02 e de 0.04.....                                      | 41 |
| Tabela 2: Transporte sedimentar para alturas de onda de 1 m e de 1.5 m.....  | 42 |
| Tabela 3: Taxas de variação da posição da linha de costa para alturas de onda de 1 m e de 1.5 m.                         | 42 |
| Tabela 4: Transporte sedimentar para alturas e períodos de onda variáveis e direções fixas .....                         | 43 |
| Tabela 5: Taxas de variação da posição da linha de costa para alturas e períodos de onda variáveis e direções fixas..... | 43 |
| Tabela 6: Resultados dos diferentes cenários (áreas de erosão/acreção e comportamento do perfil P4) .....                | 55 |
| Tabela 7: Parâmetros considerados na aplicação da formulação de Hudson (estrutura não galgável) .....                    | 71 |
| Tabela 8: Resultado da formulação de Hudson (estrutura não galgável), em função da inclinação do talude.....             | 73 |
| Tabela 9: Parâmetros para a definição da geometria da seção transversal.....   | 74 |
| Tabela 10: Resultado dos pesos unitários dos blocos, em função da inclinação do talude .....                             | 76 |



## **Capítulo 1**

### **INTRODUÇÃO**



## 1. Introdução

A erosão costeira é um processo que ocorre por vias naturais e/ou humanas, manifestando-se através de significativas alterações nas zonas costeiras, ao longo do tempo, pondo em causa todos os elementos envolventes da região. O trabalho descrito apresenta um caso real de erosão costeira, no Brasil, expondo os seus efeitos ao longo do tempo, caracterizando o local no sentido de identificar as causas mais prováveis para o acontecimento e estudando medidas capazes de mitigar a erosão sentida no litoral da zona em estudo, sendo todos estes tópicos abordados a seguir, de forma mais complementar.

### 1.1. Enquadramento

A costa de Prado, localizada no estado de Bahia, Brasil, é conhecida por possuir uma enorme extensão de praias, que tem sido afetada pelo problema de erosão. Por efeito da erosão e consequente recuo da linha de costa, Prado tem sofrido grandes prejuízos, pondo em risco não só a população que reside próximo à costa, mas também os ecossistemas envolventes e, portanto, é necessário o planeamento e a gestão territorial das zonas costeiras, e posteriormente a aplicação de medidas que contribuam para a atenuação deste problema, tendo em consideração que a erosão costeira é um fenómeno natural e/ou antropogénico.

No Extremo Sul do estado de Bahia (Figura 1), a erosão costeira tem sido um dos processos naturais que mais tem afetado o litoral brasileiro, cuja linha de costa tem estado em constante mudança. Segundo CBPM/CPRM (2000), a posição da linha de costa depende principalmente do nível de mar, do suprimento de sedimentos dos rios para a zona costeira e de fatores oceanográficos (ondas, correntes e marés).



a) Estado de Bahia, Brasil



b) Município de Prado, no estado de Bahia, Brasil

Figura 1: Localização da zona em estudo (Wikipédia, 2006)

A linha de costa do município de Prado tem vindo a modificar-se devido à sua alta probabilidade de erosão, ocorrendo perdas de terreno. Tendo em conta esta situação, a erosão conduz a perdas de construções e de propriedades, pondo em risco a população. Em 2013, na Praia do Coqueiral, houve uma rutura da linha de costa (Figura 2) causando a junção do rio Jucuruçu com o Oceano Atlântico.

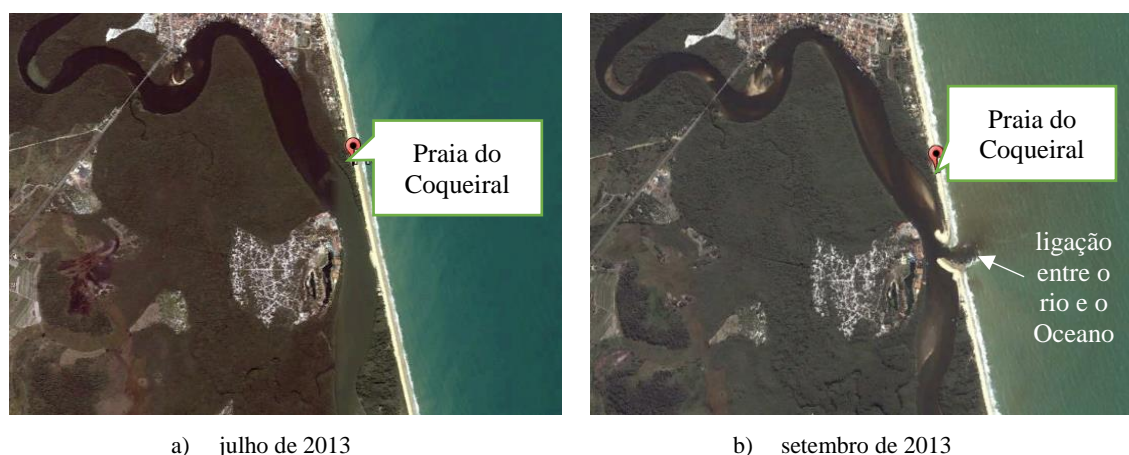


Figura 2: Rutura da linha de costa em Prado (Google Earth)

Para entender o motivo da rutura é importante conhecer as condições marítimas e fluviais que possam ter influenciado a modificação da costa, assim como a evolução da linha de costa até ao momento em que a rutura ocorreu. Os fenómenos naturais têm uma enorme influência no que diz respeito a modificações da posição da linha de costa, mas nos meios naturais, as intervenções humanas têm um impacto significativo, principalmente quando não existem medidas de preservação, de gestão e de planeamento.

A Figura 3 representa a evolução da linha de costa ao longo do tempo até ao momento da rutura, em que acontece a união do rio Jucuruçu e do Oceano Atlântico, alterando a posição da foz do rio nestes últimos anos.

- Na década de 70 do século XX a linha de costa de Prado era linear e arenosa, com uma largura de praia de, aproximadamente, 70 m com cobertura vegetal de restinga e de mangues na margem do rio e na praia, sem infraestruturas turísticas ou construções junto ao litoral (Figura 3a).
- Em 2005, a zona de estudo apresentava uma pequena construção, um dique (marcador azul), que permitia à população hospedada na infraestrutura turística



localizada em frente, desembarcar e ter acesso à praia a partir do rio. Também, nesse mesmo ano, é apresentada uma amostra do início da degradação da cobertura vegetal da margem do rio Jucuruçu na zona de rutura (Figura 3b).

- Em 2008, parte da vegetação desapareceu na zona do dique referido anteriormente (marcador azul), existindo assim mais terreno arenoso e a formação de um sulco para o rio. Ao longo da costa a vegetação é mais escassa, criando “mosaicos” de restinga que ainda permanece no local até se alcançar uma estrutura construída no meio da vegetação, com um porto virado para o rio. A infraestrutura (marcador amarelo) é um indicador da degradação da costa através de intervenções humanas, pondo em risco a estabilidade do terreno e o ecossistema envolvente (Figura 3c).
- Em 2012 o pequeno porto desaparece, permanecendo simplesmente um dique natural de areia (marcador azul), indicando uma possível movimentação de areias na direção do rio, criando sulcos ao longo das margens. Verifica-se ainda a escassez da vegetação, tornando a costa mais suscetível ao clima energético das ondas, sendo também visível um possível recuo na linha de costa (Figura 3d).
- O ano de 2013 é dividido em dois períodos, antes e após a rutura da linha de costa. No mês de julho (Figura 3e) a linha de costa mantém-se parcialmente nas condições apresentadas em 2012. No mês de setembro (Figura 3f) ocorre a rutura da linha de costa (marcador amarelo), formando dois bancos arenosos em direção ao rio, notando-se mais uma vez a escassez da vegetação a sul, em direção à estrutura existente.
- Em 2014 o mar continuou a movimentar os bancos arenosos até à infraestrutura turística (marcador azul), sendo inundada e consequentemente afetando o seu funcionamento. Também é possível verificar que a estrutura que se encontrava localizada na linha de costa acabou por não resistir à rutura e efeitos da erosão. Um cordão arenoso foi formado entre a infraestrutura e a linha de costa a sul (marcador amarelo), interrompendo a passagem de água até à foz do rio Jucuruçu. A água indica níveis de turbidez, devido talvez à retenção de sedimentos na zona norte e sul da rutura (Figura 3g).



Figura 3: Cronologia da linha de costa de Prado (Google Earth)

- Durante o ano de 2015 e 2016 houve diversas modificações no litoral de Prado, em que os sedimentos eram movimentados através da ação marítima, acabando por invadir ainda mais a infraestrutura turística, destruindo a maior parte da construção. Na zona, por onde passava o rio, formaram-se vários bancos arenosos impedindo ou atenuando a passagem de água, notando-se as consequências da erosão nalgumas partes da costa e do rio. Em 2015 o rio aparenta ter um caminho margeado por terrenos arenosos que permite a passagem de água (marcador azul). Existe um recuo da linha de costa e consequentemente uma redução da cobertura vegetal (Figura 3h). Em 2016 volta-se a formar um cordão arenoso impedindo mais uma vez a passagem de água na zona sul da rutura (marcador amarelo). Uma parte da infraestrutura turística é destruída e inundada, ficando quase irreconhecível quando comparada com o instante antes da erosão (marcador azul). A linha de costa indica degradação a nível da sua configuração e da cobertura vegetal, que continua a ser destruída pela ação marítima (Figura 3i).

A erosão costeira observada em Prado não apresenta relação com uma possível elevação do nível relativo do mar, mas por processos associados à dispersão e acumulação de sedimentos ao longo da linha de costa, à dinâmica de desembocaduras fluviais, à interferência humana e à tendência de longo prazo para um balanço negativo de sedimentos (Santos, 2006).

## 1.2. Objetivos

Perante a situação descrita, a dissertação tem como principal objetivo o estudo de uma zona costeira do Brasil, nomeadamente no município de Prado, Bahia, cuja área apresenta grande vulnerabilidade à dinâmica costeira. O estudo pretendeu proceder à caracterização do local e do rio que desagua neste litoral, da agitação marítima incidente na zona costeira e da evolução da linha de costa ao longo do tempo, permitindo entender as alterações morfológicas que ocorreram e assim definir as soluções de intervenção essenciais para a mitigação do problema da erosão costeira.

Após a caracterização da zona de estudo, pretende-se avaliar diferentes cenários de evolução da posição da linha de costa em conjunto com várias intervenções de defesa costeira, através de um modelo numérico de simulação, o LTC, de modo a selecionar a mais adequada para a situação ocorrida em Prado. Escolhido o cenário de intervenção, pretende-se apresentar o

dimensionamento da seção transversal da obra a executar, incluindo todas as características do manto resistente e das diversas camadas que constituem o perfil transversal da obra. Por fim, com este trabalho, pretende-se também expor algumas considerações relevantes para o estudo da dinâmica costeira, em termos genéricos e globais, contribuindo para o alerta da importância do planejamento e gestão costeira.

### **1.3. Estrutura do relatório**

Para cumprir com os objetivos, foram propostas diversas tarefas, que foram realizadas consoante a estrutura apresentada de seguida. No capítulo 1 é apresentado um contexto do tema que irá ser tratado ao longo deste relatório, através da discriminação do problema de erosão e a sua evolução até à atualidade, juntamente com os objetivos que se pretendem alcançar. No capítulo 2 é referido a caracterização do local de estudo, dividido em vários subcapítulos, relativos à localização e origem da cidade de Prado, à sua constituição populacional e económica, à agitação marítima a que a zona costeira está sujeita, estudando o comportamento das marés e das ondas, e à geomorfologia do litoral, indicando as respetivas características da região.

No capítulo 3 é apresentado o rio Jucuruçu, designando a localização e a composição da bacia hidrográfica correspondente (geologia, vegetação e caudais), sendo um dos tópicos importantes, permitindo compreender a influência do rio sob o local onde ocorreu a rutura da linha de costa.

No capítulo 4 é apresentado o modelo numérico necessário para a simulação das possíveis estruturas de defesa costeira, que possibilita avaliar cenários de evolução da linha de costa e o estudo do seu comportamento a médio e longo prazo, enquanto que o capítulo 5 refere os cenários testados através desse modelo numérico, identificando as intervenções simuladas, e a discussão entre os resultados obtidos e a escolha final da obra de defesa costeira.

O capítulo 6 é referente ao dimensionamento da estrutura selecionada para mitigar o problema de erosão na zona de Prado, salientando o modelo numérico utilizado na definição estrutural da intervenção, que engloba diversos parâmetros essenciais para a respetiva conceção (tipo de material e de estrutura, agitação marítima, influência de pesos dos blocos, etc.). Posteriormente, é apresentado o capítulo 7, em que são expostas as conclusões

da presente dissertação e os desenvolvimentos futuros relativamente à solução proposta para o problema de erosão que tem atingido a costa brasileira ao longo dos anos, em particular na zona de Prado.



## **Capítulo 2**

# **CARACTERIZAÇÃO DA ZONA DE ESTUDO**





## **2. Caracterização da Zona de Estudo**

Para estudar o problema da erosão ocorrida em Prado, é necessário conhecer o local e todas as envolventes que podem ter influenciado a rutura da linha de costa ou ter conduzido para o agravamento da erosão, sendo assim apresentada uma breve caracterização da cidade e da zona costeira.

### **2.1. Localização**

A zona em estudo situa-se na costa do município de Prado, pertencente ao estado de Bahia, no Brasil (Figura 1). Constituído por dois distritos, Vila de Corumbau e Cumuruxatiba, o município de Prado localiza-se a uma latitude 17° 20' 28" sul e a uma longitude 39° 13' 15" oeste, tendo uma área de 1687.342 km<sup>2</sup> a 4 m de altitude (IBGE, 2016).

A cidade de Prado teve origem numa aldeia de índios descendentes de Aimorés por volta do ano de 1755, localizada na margem esquerda do rio Jucuruçu, próximo ao mar, vindo a tornar-se um dos pontos turísticos da zona sul do estado de Bahia devido à sua origem histórica e ao seu património cultural e de lazer (CEPLAC, 1976). Localizada entre a Costa do Descobrimento e a Costa das Baleias, Prado é o município que possui a maior infraestrutura turística na região, tendo como principais atrativos turísticos as praias, os recifes de corais e o seu património arquitetónico colonial datado do século XIX (Santos, 2006).

### **2.2. População e Ocupação**

Segundo o Censo de 2010 (IBGE, 2010), a cidade de Prado contava 27 627 habitantes, em que 13 990 eram homens e 13 667 eram mulheres, estimando um aumento para 29 326 habitantes em 2017 (Figura 4). A densidade demográfica é de 15.87 hab/km<sup>2</sup>, com um Índice de Desenvolvimento Humano (IDHM) de 0.621 (Atlas Brasil, 2013), colocando o município de Prado na faixa de Desenvolvimento Humano Médio (IDHM entre 0.600 e 0.699).

O desenvolvimento socioeconómico de Prado estabeleceu-se a partir de diversos sectores tais como a indústria, a agropecuária, a pesca, o turismo, entre outros. A agropecuária e o turismo são dos setores que mais se destacam, tendo uma grande influência no desenvolvimento económico da cidade de Prado (IBGE, 2010).

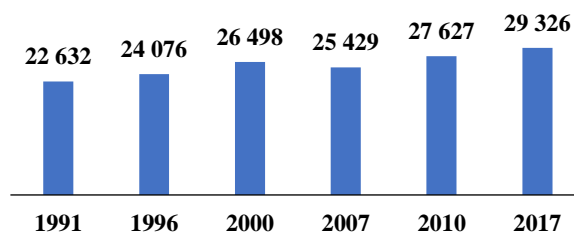


Figura 4: Evolução Populacional (IBGE, 2010)

Além disso, o município também depende de atividades agrícolas, tais como do cultivo de côco, da silvicultura e da pecuária, mas especialmente da pesca, que atualmente ainda é considerada a principal fonte de rendimento de muita população da região, sendo caracterizada pela forma artesanal de como é realizada e a organização pela comunidade pesqueira local (Santos, 2006).

### 2.3. Agitação Marítima

A caracterização da agitação marítima é importante para estimar a dinâmica sedimentar e para a concepção e dimensionamento de estruturas marítimas, de modo a impedir ou a atenuar situações que possam por em causa a estabilidade e equilíbrio da costa. As marés e as ondas são dos fatores que influenciam a agitação marítima, tendo um enorme balanço na caracterização desta.

#### 2.3.1. Marés

Comparativamente a outros países com a mesma extensão de linha de costa ou com a mesma exposição marinha, pouca importância se tem dado às observações do nível do mar no Brasil, em que a falta de informações históricas sobre o nível do mar constitui, no momento, a grande vulnerabilidade do Brasil a mudanças do nível relativo do mar (Neves e Muehe, 2008). Segundo os mesmos autores, desde 2000, instalou-se o programa Gloss-Brasil (Global Sea Level Observing System-Gloss), vinculado a um programa mais amplo denominado Global Ocean Observing System (Goos), que propunha instalar até dez estações maregráficas permanentes ao longo da costa brasileira e ilhas oceânicas.

Atualmente, das doze estações que fazem parte desta rede, apenas seis estão ativas até ao ano 2018, não estando localizadas na região de estudo. Assim, devido à falta de dados sobre

a medição do nível de água, que permitiria um estudo das marés na zona costeira de Prado, a amplitude destas foi obtida a partir da Figura 5, retirada de Muehe e Nicolodi (2017). Pode averiguar-se que a amplitude de maré junto a Prado é de 2.6 m, aumentando até a zona de Caravelas com 3.2 m, voltando a diminuir para 2.6 m até Mucuri e para 1.7 m em Conceição da Barra.

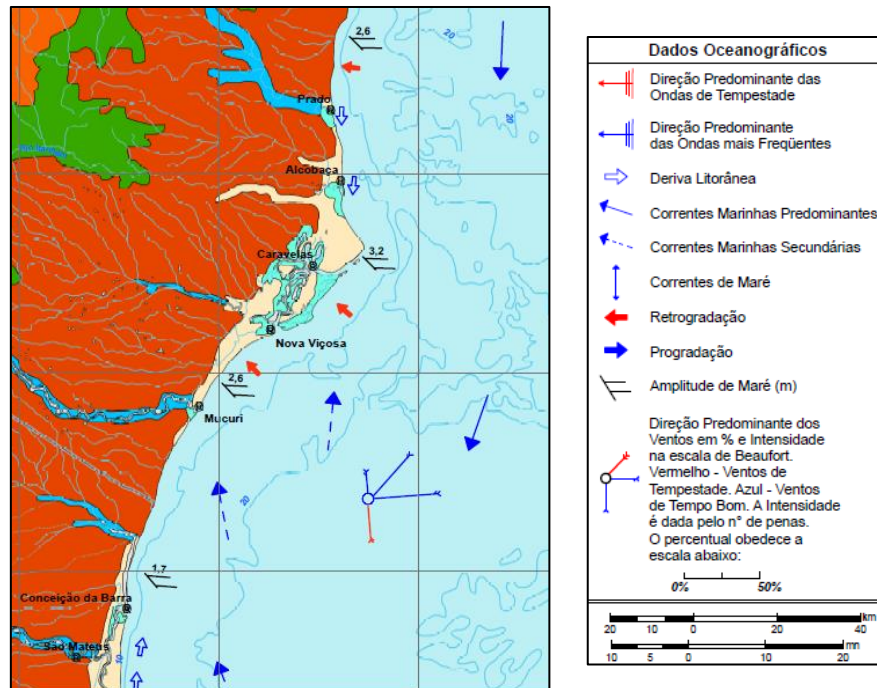


Figura 5: Amplitude das marés ao longo do litoral da Bahia (Muehe e Nicolodi, 2017)

Nas regiões costeiras podem ocorrer três tipos de marés (marés diurnas, semi-diurnas ou um misto de marés semi-diurnas), sendo a maré designada por semi-diurna (Figura 6) caso ocorram duas marés-altas e duas marés-baixas de valores aproximadamente iguais no mesmo dia (Coelho, 2005).

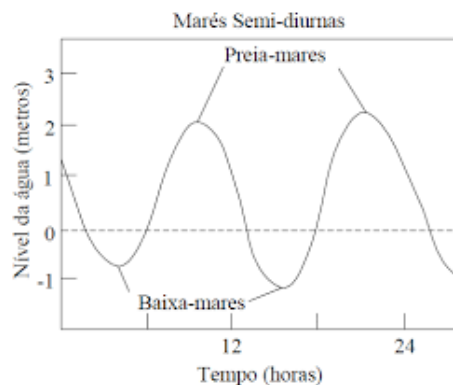


Figura 6: Caracterização de uma maré semi-diurna típica (Coelho, 2005)

De acordo com o atlas geográfico das zonas costeiras e oceânicas do Brasil (IBGE, 2011), as marés apresentam características de mesomarés e mistas (RGCI, 2017), registrando assim marés diurnas e marés semi-diurnas.

### 2.3.2. Ondas

Para a caracterização das ondas foram utilizados dados recolhidos por uma rede de boias (ondógrafos) fundeados em águas rasas ao longo da costa brasileira, Rede de Ondas, que tem como objetivo monitorizar o clima de ondas por meio do conhecimento em tempo real das condições de mar. A Rede de Ondas pretende fornecer dados valiosos para a compreensão das interações entre o continente e o oceano, projetos de engenharia costeira, portuária e oceânica, mineração marinha, navegação, estudos de variações da linha de costa e de processos litorais, entre outros (GOOS-BRASIL, 2017). Dentro desta rede existem três boias que se localizam perto da zona de estudo: Recife, Praia do Forte e Rio de Janeiro (Figura 7).



Figura 7: Localização de boias ao longo do litoral da Bahia (GOSS-BRASIL, 2017)

Das três boias para a recolha de dados, a mais pertinente para o local de estudo seria a Praia do Forte, pois localiza-se mais perto que a boia Recife, onde as alturas de ondas são inferiores, e numa zona costeira semelhante à de Prado. Uma das razões para excluir a boia localizada perto do Rio de Janeiro, é que se encontra numa zona mais protegida e, portanto, o clima de agitação terá um comportamento diferente quando comparado com o local pretendido.

Através da boia localizada na Praia do Forte, a uma latitude  $12^{\circ} 36' 14''$  sul e a uma longitude  $37^{\circ} 58' 32''$  este, foi possível identificar a altura das ondas e os correspondentes períodos. Como se pode observar na Figura 8, os registos desta boia iniciam-se em 2014 e vão até 2017,

existindo algumas falhas em 2015, possivelmente devido a motivos de avaria ou de manutenção da própria boia.

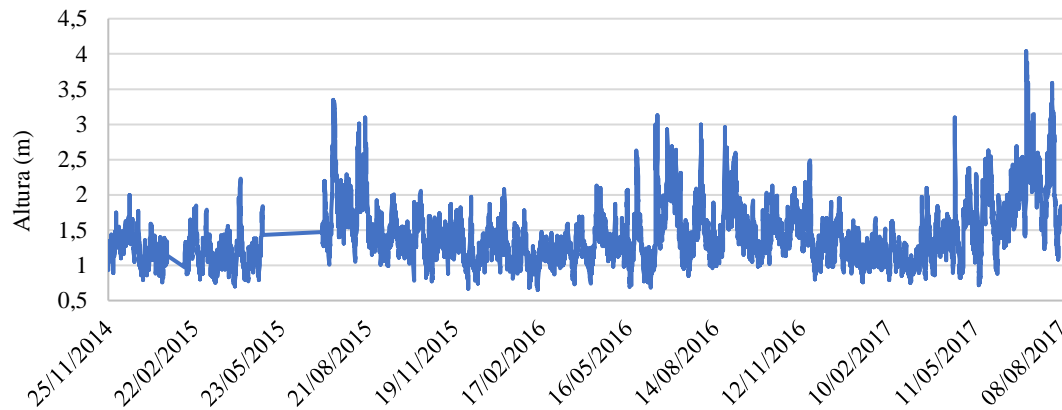


Figura 8: Altura das ondas significativas da boia “Praia do Forte”, entre 2014 e 2017 (GOOS-BRASIL, 2017)

Pelos dados observados, a altura máxima atingida pelas ondas foi de, aproximadamente, 4 m em julho de 2017, verificando-se que as ondas atingem alturas maiores entre maio e agosto. Em geral, as ondas variam entre 1,5 a 2 m de altura, mas em determinados períodos variam entre 2,5 a 3,5 m, registrando-se as maiores alturas no ano de 2017. De acordo com a Figura 9, as ondas ocorrem com mais frequência nas direções sudeste e este, com alturas entre 1 a 4 m, nomeadamente para sudeste com ondas de 2 a 3 m, havendo ainda alguns registos na direção sul e nordeste, com alturas entre 1 a 3 m.

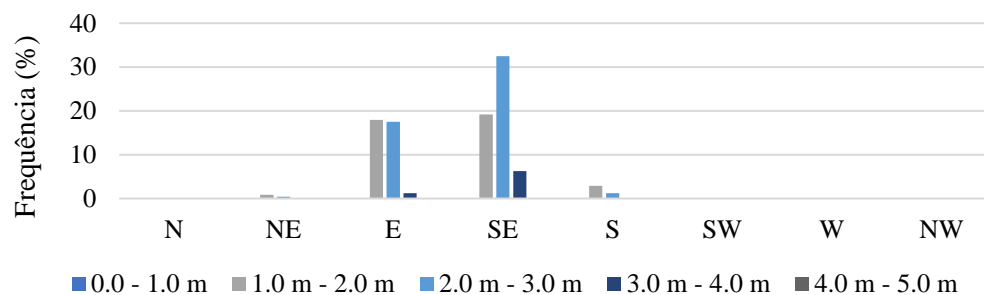


Figura 9: Frequência e orientação das ondas na boia “Praia do Forte”, entre 2014 e 2017 (GOOS-BRASIL, 2017)

Segundo Santos (2006) existem dois tipos de rebentação ao longo da costa de Prado, a progressiva, que ocorre de forma contínua, e a mergulhante, que ocorre de forma súbita, sendo esta última a rebentação predominante no litoral do município.

## 2.4. Geomorfologia, Vegetação e Dinâmica Costeira

Para compreender a origem da erosão é essencial conhecer a constituição do local onde ocorreu a erosão, identificando todos os elementos apresentados ao largo da zona costeira. É importante destacar os elementos independentemente da permanência destes, pois é a partir dessa noção que se pode observar o agravamento da erosão e talvez a sua previsão ao longo do tempo. Segundo Muehe e Nicolodi (2017) a zona costeira de Prado engloba 4 tipos de relevo: Tabuleiros Costeiros, Planícies Costeiras, Planícies de Mangue e Planície Fluvial (Figura 10 e Figura 11).

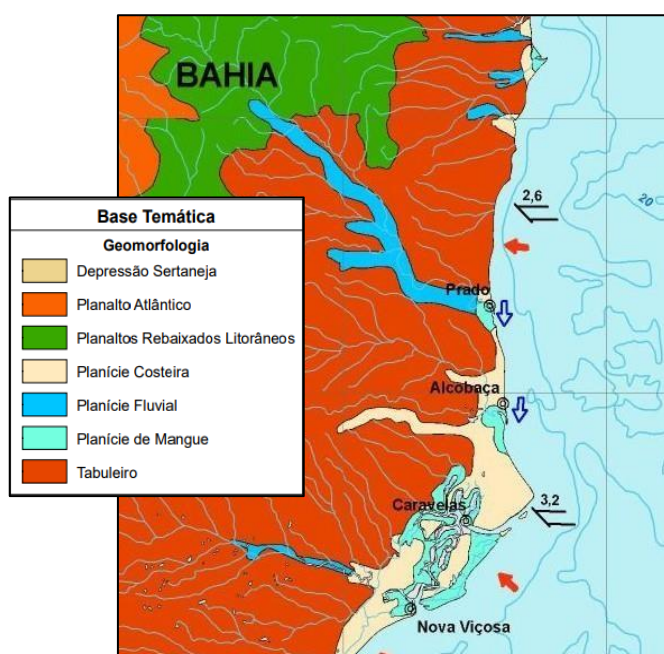


Figura 10: Geomorfologia litoral de Prado (Muehe e Nicolodi., 2017)

Os Tabuleiros Costeiros (Figura 11a), resultantes de depósitos do Grupo Barreiras, predominam até ao norte da cidade de Prado, atingindo por vezes a linha da costa por meio de falésias, dando lugar à planície costeira de acreção do rio Caravelas, entre Alcobaça e Nova Viçosa (Muehe e Nicolodi, 2017).

O Grupo Barreiras constitui uma cobertura sedimentar terrígena continental que se encontra ao longo do litoral brasileiro, cujas ocorrências mais importantes localizam-se nas regiões extremo sul e nordeste, que devido a fases de erosão deu origem a relevos de topos planos ou encostas íngremes, tais como os Tabuleiros Costeiros (Boas *et al*, 2011).





a) Tabuleiros Costeiros (Praias da Bahia, 2018)



b) Planície Costeira (Jornal Alerta, 2018)



c) Planície Fluvial (Natureza da Bahia, 2011)



d) Planície de Mangue (Prado Turismo, 2015)

Figura 11: Tipos de relevo do litoral do Prado

Segundo CBPM/CPRM (2000), existe um ecossistema restrito essencialmente aos Tabuleiros Costeiros, tendo sofrido uma enorme devastação, a Mata Atlântica (Figura 12a), considerada uma floresta tropical que abrange a costa leste, sudeste e sul do Brasil, leste do Paraguai e ainda uma província na Argentina. As florestas tropicais são ecossistemas que detêm a maior diversidade de espécies, em que a Mata Atlântica engloba um variado conjunto de ecossistemas florestais com estruturas e composições florísticas bastante diferenciadas, acompanhando a diversidade dos solos, relevos e características climáticas da região onde ocorre, tendo como elemento comum a exposição aos ventos húmidos do oceano. As formações vegetais presentes na Mata Atlântica atingem até cerca de 40 metros de altura, apresentando folhas largas, sempre verdes, com vários estratos.

Apontada como uma das florestas tropicais mais ameaçadas de extinção, a Mata Atlântica possuía uma extensão de cerca de 1 000 000 km<sup>2</sup> (12% do território do Brasil), na época dos descobrimentos, estando atualmente reduzida a cerca de 5% da sua cobertura original. A

maior parte das espécies da fauna e da flora brasileiras em vias de extinção, são exclusivas da Mata Atlântica. Contudo, ainda possui remanescentes florestais de grande beleza e importância, protegidos através de Unidades de Conservação (Parques Nacionais do Pau-Brasil, de Monte Pascoal, e do Descobrimento), sendo a última pertencente à região de Prado.



a) Mata Atlântica (Wikiparques, 2017)



b) Restinga (Campos, 2017)



c) Mata ciliar (CBPM/CPRM, 2000)



d) Mangues (Prado Turismo, 2015)

Figura 12: Vegetação no município de Prado

A Planície Costeira (Figura 11b) entre Prado e Caravelas engloba sedimentos quaternários (mais recentes), de origem marinha e flúvio-estuarina, provenientes da foz dos rios Jucuruçu e Caravela e/ou correntes de deriva litoral, entre outras eventualidades. As planícies costeiras são formadas por sedimentos terciários ou quaternários depositados na costa, através da justaposição de cordões litorais, uma das características mais marcantes da zona costeira do Brasil (Campos, 2017). Em consequência das planícies costeiras, compostas por uma sucessão de terraços arenosos, desenvolveram-se comunidades vegetais que se diversificam desde formações herbáceas por arbustivas, até matas de 12 m de altura, dando-se o nome genérico de restinga (CBPM/CPRM, 2000).



As restingas (Figura 12b) são consideradas áreas de extensão de espécies vegetais de outros ecossistemas, devido à diversidade das condições físicas em que se apresentam. Estas possuem propriedades que permitam adaptações morfológicas, aumentando a sua resistência ao ambiente relativamente seco dos terraços arenosos, em que as folhas são capazes de armazenar água e reduzir a perda por evaporação. Ao contrário do que ocorre na maioria dos ecossistemas terrestres, o solo não constitui a principal fonte de nutrientes, pois os solos arenosos onde a restinga se desenvolve, são pobres em argilas e em matéria orgânica, apresentando também uma baixa capacidade de reter água e nutrientes.

Assim, dada à proximidade do mar, a fonte de nutrientes passa a ser a maresia presente na atmosfera, sendo necessário desenvolver características que facilitam a intercetação da precipitação da cobertura vegetal e do solo, de modo a obter uma maior eficiência na captação dos nutrientes e da água de origem atmosférica (ex.: bromélias). Quando não possuem estas adaptações, as plantas da restinga têm sistemas radiculares extensos e superficiais que aumentam significativamente a sua superfície de absorção, contribuindo ainda para a fixação dos solos, sendo assim protegidas por lei devido à sua fragilidade (CBPM/CPRM, 2000). Parte desta comunidade foi destruída pelo intenso nível de exploração litoral (madeira, pecuária, silvicultura) e pelo cultivo de coqueiros desde o tempo colonial.

As Planície Fluviais (Figura 11c) correspondem a áreas planas ou levemente inclinadas contendo sedimentos quaternários de textura, permeabilidade e coesão variáveis, referentes a depósitos areno-argilosos fluviais, que são constituídos por sedimentos de diques marginais, de barras de meandros e de canais abandonados, que ocorrem em estreita associação com os principais rios que desaguam na região. As ocorrências mais expressivas destes depósitos são encontradas na planície fluvial do rio Jequitinhonha e na Planície do rio Jucuruçu (Amorim, 2016).

A cobertura vegetal predominante nas Planícies Fluviais é a mata ciliar (Figura 12c), uma formação vegetal ribeirinha que ocorre ao longo dos cursos de água, constituída de plantas de porte alto (20 a 50 m), médio (20 a 30 m) e baixo (5 a 20 m) de rápido crescimento, em geral com casca lisa e tronco cônico, por vezes com forma característica de botija e raízes tabulares, apresentando também muitas palmeiras no estrato intermediário (CPBM/CPRM, 2000). Para Amorim (2016), a retirada da mata ciliar e a devastação da Mata

Atlântica na região, sendo substituídos pela lavoura cacaueteira, têm alterado os fluxos de matéria, levando a uma modificação da dinâmica desses sistemas naturais, expondo assim os solos aos processos erosivos e, conseqüentemente, acentuando o assoreamento dos rios.

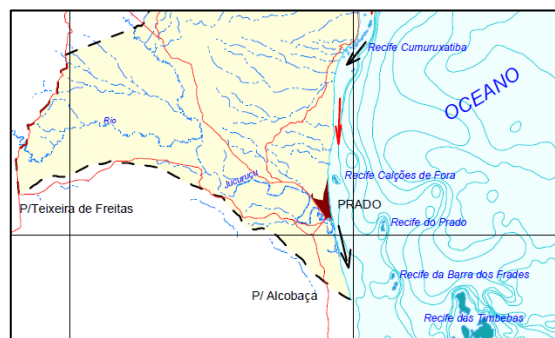
As Planícies de Mangue (Figura 11d) são formadas através de processos de ações marinhas e fluviais, em que correspondem às acumulações de origem flúvio-marinha (Planícies Flúvio-Marinhas), sendo assim constituídas as configurações morfológicas da faixa litoral, englobando os estuários e os deltas, mantendo uma relação direta com falésias nalgumas áreas. A ação das ondas, correntes e marés provocam uma intensa abrasão e inundações nas áreas deltaicas, determinando a predominância dos processos de erosão e acumulação sobre os de alteração e formação dos solos (BRASIL, 1987). Segundo Amorim (2016), as Planícies Flúvio-Marinhas só se desenvolveram nalgumas bacias hidrográficas sendo uma delas a Bacia de Jucuruçu. Como o termo indica, a vegetação predominante deste tipo de planície é o mangue, um grupo de plantas adaptadas para colonizar solos saturados em água, pertencentes a um ecossistema de terra húmida por água salgada, designado manguezal.

Os manguezais (Figura 12d) são ecossistemas que se formam em regiões de mistura de águas doces e salgadas, sendo um dos ambientes naturais mais ameaçados do Brasil. Desempenham funções de importância ecológica e económica, das quais se destacam o efeito de proteção da linha costeira e uma barreira mecânica à ação erosiva das ondas e marés, assim como uma área de abrigo e alimentação de inúmeras espécies, essenciais para a sobrevivência da população que depende do rio (FEMAR, 2001).

No estado de Bahia estima-se que a área de manguezais chegue a 800 km<sup>2</sup>, distribuída ao longo da costa, estando a maior percentagem de manguezais localizada entre os municípios de Valença e de Maraú e nos municípios de Canavieiras e de Caravelas. Em consequência da expansão urbana e industrial, este ecossistema tem sido progressivamente destruído ou poluído, influenciando vários domínios que se encontram interligados e, portanto, devido à sua importância os manguezais são considerados atualmente Áreas de Preservação Permanente (APP). Existem diversos manguezais no Brasil reconhecidos como APP, sendo preservados por lei de forma a proteger os seus recursos costeiros, mas que por si só não é suficiente para impedir a degradação de um ecossistema considerado o “berçário da natureza” (Rosseti, 2017).

Considerando a dinâmica costeira da zona de Prado, observa-se na Figura 13a (ver também

Figura 5) que a deriva litoral é no sentido norte-sul, desde Prado até Caravelas e posteriormente no sentido sul-norte, o que explica os diferentes tipos de formas de acumulação de sedimentos na costa brasileira, como, por exemplo, em Caravelas e Ponta de Corumbau. É a partir desta movimentação que diversas zonas do estado de Bahia se encontram em acreção, avanço da linha de costa, ou em erosão e consequente recuo da linha de costa (CBPM/CPRM, 2000). O mesmo autor considera que os padrões de dispersão dos sedimentos são controlados essencialmente pela circulação das águas costeiras, influenciada pela interação de diversos fatores. As Figuras 13b e 13c representam uma medição indireta desses padrões através dos níveis de turbidez das águas costeiras. As principais fontes de material em suspensão são provenientes das desembocaduras fluviais ou derivam da ressuspensão por ação de ondas ao longo da linha de costa ou em torno dos recifes de corais, tornando o padrão de circulação complexo ao interagir com as correntes.



a) Deriva litoral na costa de Prado (CBPM/CPRM, 2000)

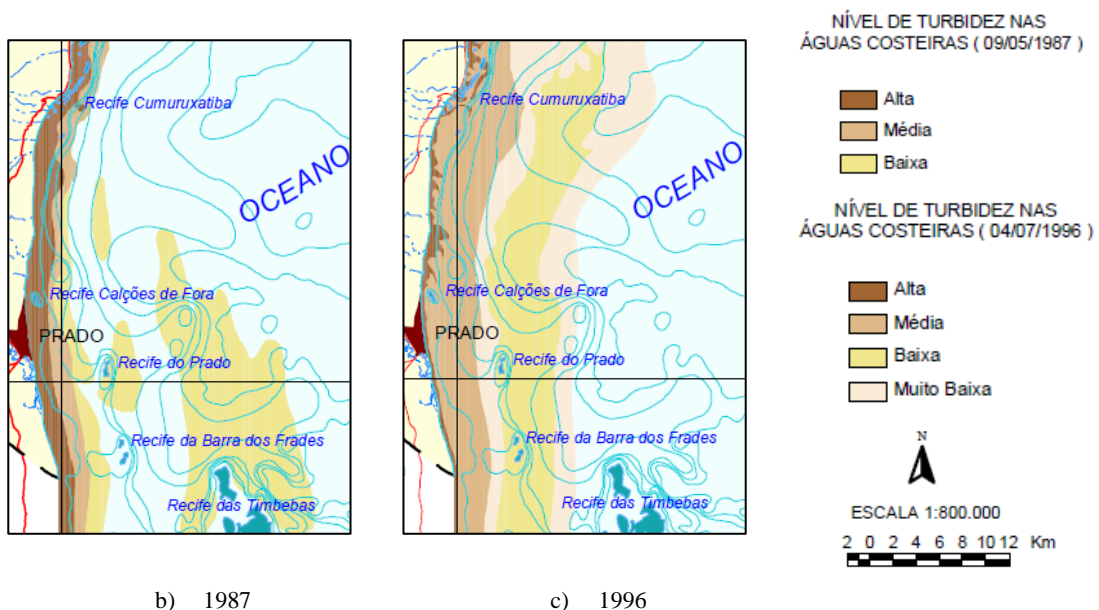


Figura 13: Deriva litoral na costa do Prado e padrão de sedimentos em 1987 e em 1996 (CBPM/CPRM, 2000)

Na análise desta figura é possível observar que no ano de 1987 o nível de turbidez era mais alto junto à zona de estudo, enquanto que no ano de 1996 houve uma redução no nível de turbidez, contudo uma maior dispersão de sedimentos, podendo assim indicar uma limitação destes ao longo da linha de costa.

## 2.5. Topografia e Batimetria

A Figura 14a demonstra que grande parte da extensão territorial do Extremo Sul da Bahia está inserida em cotas altimétricas inferiores a 300 metros, nomeadamente, parte da zona litoral de Prado, que apresenta cotas inferiores a 200 m de altitude, vindo a aumentar em direção ao interior do Brasil, destacando a predominância de planícies e de formações do Grupo Barreiras na costa brasileira.

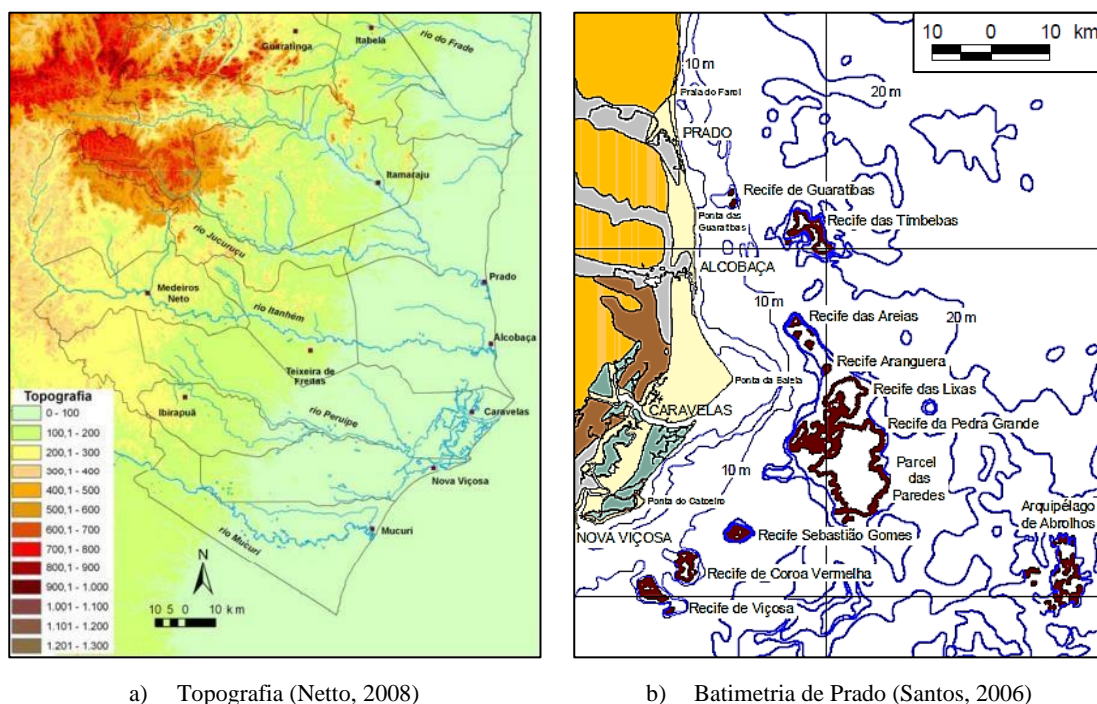


Figura 14: Topografia do Extremo Sul de Bahia e batimetria da zona costeira de Prado

Em relação à fisiografia oceânica, na parte norte do Extremo Sul da Bahia, entre as cidades de Canavieiras e Belmonte, ocorre um alargamento da plataforma continental, formando o Banco Royal Charlotte, com uma largura de aproximadamente de 100 km, tornando-se estreita a sul do banco Royal Charlotte, entre a Ponta de Corumbau e a cidade de Prado. Quase em frente à cidade de Prado, a plataforma continental volta a alargar-se abruptamente, criando o Banco dos Abrolhos. O Banco de Abrolhos, com uma área aproximadamente de 6000 km<sup>2</sup>, possui a área mais extensa e diversificada de corais do Brasil, em profundidades

inferiores a 30 m, dividindo-se em dois arcos (interno/costeiro e externo) situados de forma quase paralela à costa. Os recifes apresentados (Figura 14b), pertencentes ao Banco de Abrolhos, localizam-se a sul de Prado, excluindo a interferência na propagação de ondas da zona em estudo (Netto, 2008).

Considerando a batimetria do litoral de Prado, a Figura 15 apresenta uma carta náutica adquirida do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), um documento cartográfico que resulta de levantamentos de áreas oceânicas, mares, baías, rios, canais, lagos e lagoas, que se destinam a servir de base à navegação, fornecendo informações sobre profundidades, perigos à navegação, natureza do fundo e outras indicações necessárias à segurança da navegação (CHM, 2018).

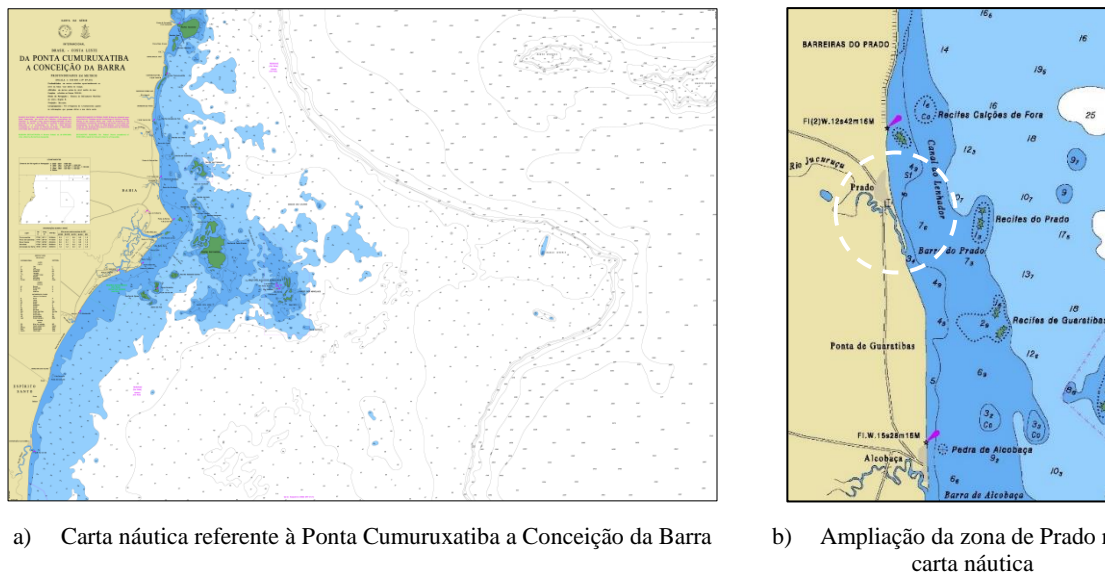


Figura 15: Carta Náutica (CHM, 2018)

A carta náutica será um elemento essencial para a simulação de intervenções que vão contribuir para a mitigação do problema de erosão a ocorrer em Prado, sendo referida com mais detalhes na subseção 4.2.1.



## **Capítulo 3**

### **RIO JUCURUÇU**





### 3. Rio Jucuruçu

O estudo do rio Jucuruçu é essencial para compreender o impacto que possa exercer sobre as zonas envolventes e a influência sobre a rutura da costa, tendo sido efetuada uma caracterização do rio, incluindo a localização e a descrição da respetiva bacia hidrográfica.

#### 3.1. Localização

O rio Jucuruçu (Figura 16) é constituído pela junção de dois rios, Prado Grande ou Braço Norte e Pradinho ou Braço do Sul, unindo-se no município de Duas Barras, a 24 km da sua foz, na Praia da Barra, próximo à cidade de Prado (CEPLAC, 1976). Também é denominado por Rio Juruçu ou Rio do Prado.

O Braço do Norte nasce na Serra dos Aimorés, no município de Felisburgo, pertencente ao estado de Minas Gerais (MG), a 40 km da fronteira do estado de Bahia, com uma extensão de 170 km. O Braço do Sul nasce na fronteira entre os estados de Bahia e Minas Gerais, servindo de divisão entre os municípios de Jucuruçu e Vereda, com uma extensão de 100 km (Oliveira, 2013).

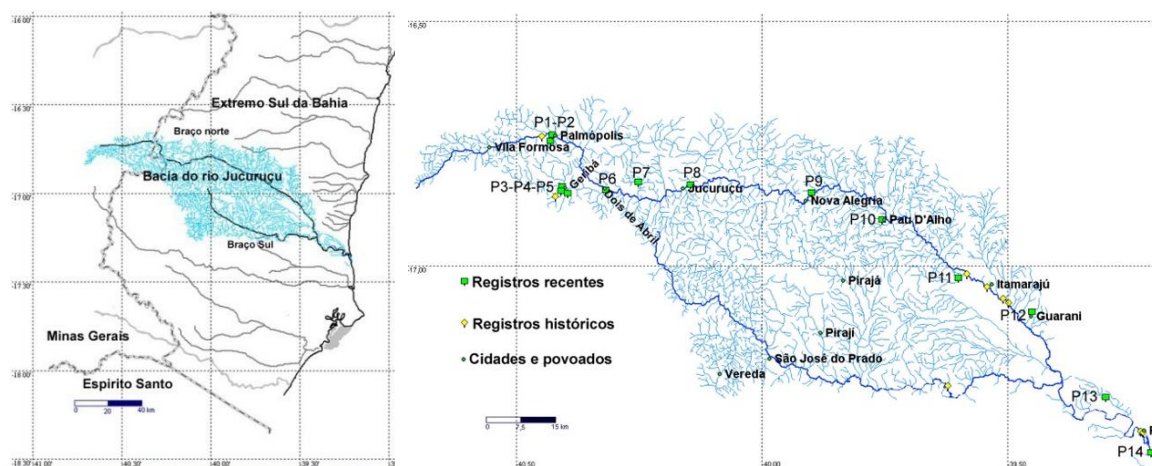


Figura 16: Localização do Rio Jucuruçu (esquerda) e respetiva bacia hidrográfica (direita) (Sarmento-Soares *et al.*, 2009)

#### 3.2. Bacia do Rio Jucuruçu

A bacia do rio Jucuruçu (Figura 16) drena sete municípios, sendo três no estado de Minas Gerais (Palmópolis, Felisburgo e Rio do Prado) e quatro no estado de Bahia (Vereda, Jucuruçu, Itamaraju e Prado), apresentando uma área total de 5284.3 km<sup>2</sup>

(Sarmiento-Soares *et al.*, 2009), com orientação no sentido oeste-leste. A bacia do rio Jucuruçu assume uma importância internacional por fazer parte do Corredor de Biodiversidade da Mata Atlântica, tendo como objetivo preservar os fragmentos florestais restantes em prol das espécies e ecossistemas (CEMIG, 2017). Grande parte da mata ciliar dos rios e da Mata Atlântica foi removida devido à ocupação das margens e à exploração madeireira, causando enorme impacto na paisagem e um intenso assoreamento do rio (CEPLAC, 1976).

### **3.2.1. Geologia**

A bacia encontra-se dividida em três partes de modo a facilitar a sua caracterização, no sentido oeste-leste. O terço superior apresenta declividades mais acentuadas, com intrusões de maciços graníticos, cuja rede de drenagem é marcada por encachoeiramentos (Sarmiento-Soares *et al.*, 2009). O terço médio tem uma declividade mais suave, influenciada pelo relevo plano dos Tabuleiros Costeiros (Sarmiento-Soares *et al.*, 2009), que são constituídos por areias argilosas e siltosas e por arenitos argilosos (CEPLAC, 1976). O terço inferior, em direção à foz, possui um relevo quase plano (Sarmiento-Soares *et al.*, 2009) constituído por areias de diversas granulometrias, de alta permeabilidade, formando os cordões litorais e as dunas devido à baixa capacidade de carga do rio (CEPLAC, 1976).

### **3.2.2. Vegetação**

Nas margens do rio Jucuruçu, nomeadamente no estuário, predominam manguezais e vegetação de restinga que, como referido na secção 2.4, são ecossistemas de grande importância para o impedimento da erosão, assim como para a proteção de várias espécies, permitindo um equilíbrio ecológico e económico. Ainda nas margens do rio, próximo da cidade de Itamaraju, existem áreas de cultivo de cacauzeiro. A oeste predominam áreas de pastagem devido à zona pecuária das bacias que se interligam com a de Jucuruçu, assim como pequenos fragmentos da Mata Atlântica, também presentes na restante bacia. Parte desta vegetação tem desaparecido em função da intensa exploração a que tem sido sujeita, permanecendo apenas pequenos indicativos do que existia anteriormente ao tempo colonial (CEPLAC, 1976).

### 3.2.3. Caudais

O rio Jucuruçu é um dos elementos mais relevantes para o transporte de caudais sólidos, que poderá influenciar a dinâmica costeira através dos sedimentos trazidos até a foz. Por outro lado, a compreensão do efeito dos caudais líquidos na dinâmica sedimentar fluvial também é essencial para determinar o comportamento do rio e possíveis consequências que possam vir a ter impacto nas regiões envolventes.

Com o intuito de determinar a influência dos caudais provenientes do rio Jucuruçu sob a erosão na zona de Prado, foram selecionadas cinco estações pluviométricas e fluviométricas (Figura 17), de forma a compreender a variação das precipitações durante o ano e os correspondentes caudais: 1) Estação Jucuruçu; 2) Estação São José do Prado; 3) Estação Cachoeira Grande; 4) Estação Fazenda Rio do Sul e 5) Estação Itamaraju.

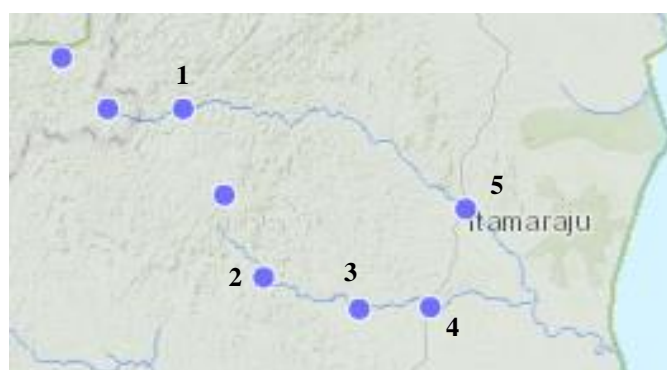


Figura 17: Estações de medição dos caudais da bacia do rio Jucuruçu, cujos números correspondem às estações descritas no texto (ANA, 2017)

Através da Agência Nacional de Águas (ANA), foi possível efetuar uma análise dos caudais anuais (Figura 18), permitindo destacar a sua evolução e registrar as variações ocorridas ao longo dos tempos. A variabilidade dos caudais anuais é regular até ao ano 2013, a partir do qual ocorre um decréscimo brusco nos caudais em todas as estações de onde foram recolhidos dados, não tendo sido estipulada a causa dessa redução.

No entanto, pode ter vindo a ter impacto no transporte dos caudais sólidos para a foz do rio Jucuruçu e, conseqüentemente, no processo de erosão visível verificado na linha de costa.

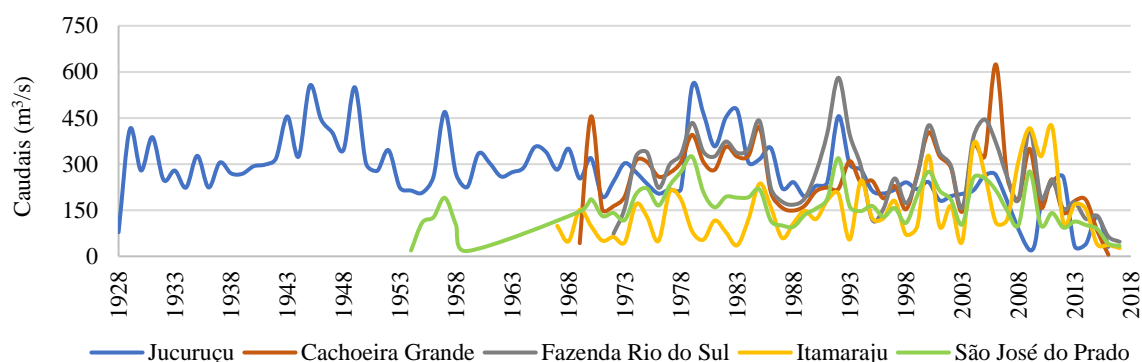


Figura 18: Caudais anuais correspondentes às estações referidas ao longo do rio Jucuruçu (ANA, 2017)

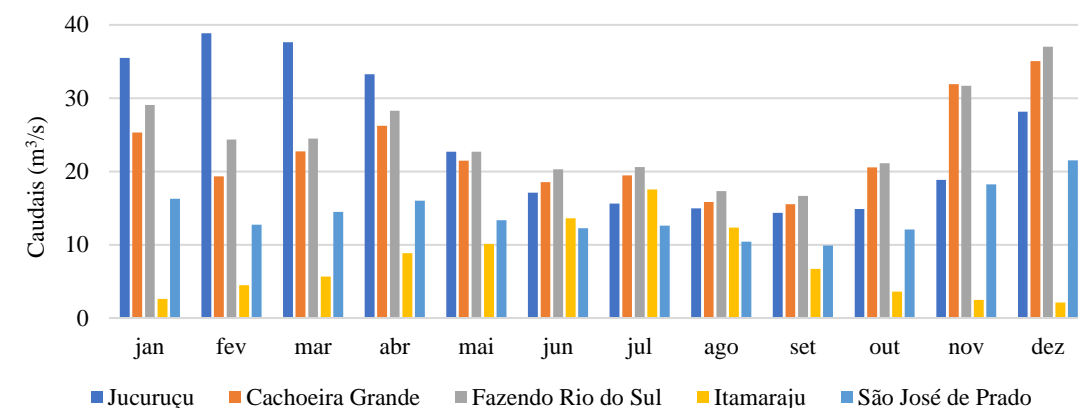
No estudo realizado por Netto (2008), averigua-se que o rio Jucuruçu possui os maiores caudais médios entre outubro e abril, período que corresponde aos meses mais chuvosos do estado de Bahia, indicando que os caudais são em função da precipitação que ocorre na região.

Na Figura 19a confirma-se que o rio Jucuruçu possui os maiores caudais médios entre novembro e abril, período correspondente aos meses mais chuvosos do estado de Bahia (Figura 19b). Este facto comprova que os caudais médios registados têm uma grande relação com a precipitação, à exceção da estação Itamaraju, que apresenta maiores caudais no mês de julho, apesar da pluviosidade ser maior entre outubro e dezembro, nas restantes estações.

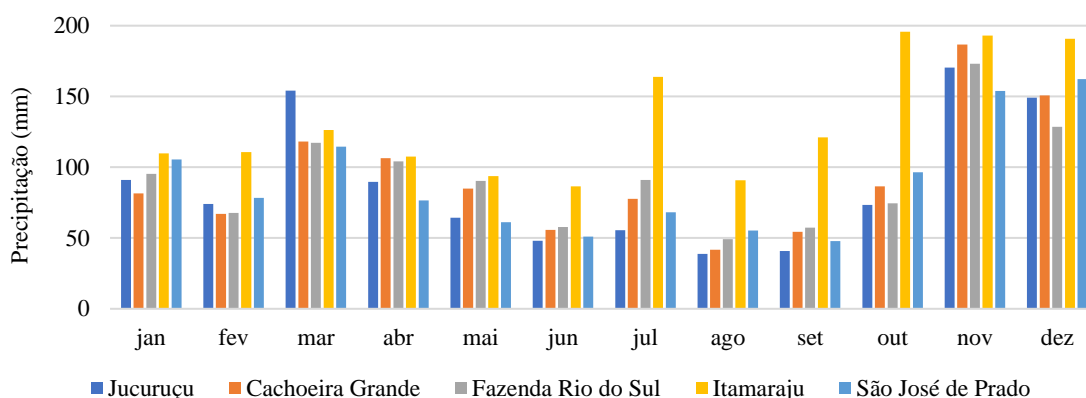
Para a estação de Itamaraju, no mês de julho existe maior pluviosidade e, consequentemente, um maior caudal, o que não ocorre nos últimos meses do ano. Há uma significativa distinção na precipitação do mês de julho para agosto, o que pode ter levado a que o terreno tenha aumentado a sua taxa de infiltração durante os meses seguintes e, portanto, quando houve um aumento do índice pluviométrico, esses responderam com caudais mais baixos. No entanto a discrepância entre valores dos caudais e das precipitações acautela para um estudo mais profundo dos dados recolhidos consoante a topografia do local e os registos obtidos pela estação.

Segundo CBPM/CPRM (2000), as principais áreas com risco de inundação são o fundo dos vales que cortam os tabuleiros costeiros como o rio Jucuruçu e as áreas de terras húmidas. Nessas regiões, além da inundação resultante da acumulação direta das águas pluviais, ocorrem também inundações resultantes do transbordamento dos rios em época de cheias, sendo construídos canais de drenagem para facilitar o escoamento das águas pluviais e

consequente destruição dos ecossistemas existentes em terras húmidas. Apesar do descrito, no rio Jucuruçu, o risco de inundação é praticamente nulo tendo em conta que o terreno é caracterizado por solos bem drenados, que favorecem a infiltração das águas pluviais.



a) Caudais médios mensais



b) Precipitações médias mensais

Figura 19: Caudais e precipitações médias mensais medidas nas estações descritas no texto (ANA, 2017)

Deve-se ainda salientar que não foram identificados elementos bibliográficos com referências a caudais sólidos provenientes do rio Jucuruçu e à sua influência na zona costeira de Prado, tendo sido apresentadas algumas considerações que possam ter tido um efeito relevante na erosão ocorrida na linha de costa. Também não foram identificadas grandes obras, como barragens, que pudessem condicionar os comportamentos fluviais e a dinâmica sedimentar na bacia hidrográfica do rio Jucuruçu.



## **Capítulo 4**

### **MODELO LTC**





## 4. Modelo LTC

Para poder apresentar soluções para a mitigação da erosão costeira é importante entender o comportamento da linha de costa e tentar prever a sua configuração ao longo do tempo em função de diferentes cenários de intervenção. Esta análise permite não agravar o problema de erosão nas zonas vizinhas de forma inesperada, gerando prejuízos e situações de erosão de maior dimensão. Para desenvolver essa análise será utilizado um tipo de modelação que permite avaliar cenários de evolução da linha de costa perante diferentes intervenções e auxiliar no estudo do seu comportamento a médio e longo prazo, o modelo numérico LTC (Coelho, 2005).

### 4.1. LTC

O LTC (*Long-Term Configuration*) é um exemplo de um modelo numérico, desenvolvido para prever o comportamento da configuração da linha de costa ao longo do tempo (Coelho, 2005). Foi concebido para análise de praias arenosas (sedimentos não coesivos), cujo processo que controla a evolução da linha da costa é o transporte sedimentar longitudinal, dependendo assim das condições de agitação marítima, do nível da água do mar, da existência de fontes/sumidouros de sedimentos, das características sedimentares e morfológicas da praia, das estruturas de defesa costeira existentes e das condições fronteira (Coelho *et al.*, 2006). O modelo estima o volume de sedimentos em erosão ou acreção ao longo de cada trecho da praia, sendo este volume distribuído uniformemente pelo perfil transversal, originando a variação de todos os pontos do perfil ativo.

Segundo Coelho e Lima (2017), o modelo LTC assume que cada onda atua individualmente durante um determinado período, simulando o processo de propagação da onda desde o largo até à rebentação, estimando o transporte sólido longitudinal induzido em cada trecho elementar da praia e avaliando qual o volume de sedimentos em erosão ou acreção. Como referido, o volume calculado é distribuído pelo perfil transversal ativo, definido entre o limite de espraiamento máximo da onda ( $R_u$ ) e a profundidade de fecho ( $DoC$ ). Para fazer uma estimativa da taxa potencial de transporte longitudinal ( $Q$ ), o modelo inclui duas formulações, a expressão de CERC (SPM, 1984) e a expressão desenvolvida por Kamphuis *et al.* (1986), a partir dos valores encontrados para as características da onda na rebentação, das propriedades da água e dos sedimentos e da topo-hidrografia, ao longo do

sector costeiro modelado.

O modelo LTC foi elaborado para uma melhor compreensão da capacidade de previsão da evolução da posição da linha de costa ao longo do tempo, permitindo assim ser utilizado como uma ferramenta complementar na análise de situações de vulnerabilidade e risco à ação do mar e na seleção de intervenções para controlo da erosão. Através do estabelecimento de cenários naturais e antropogénicos, o LTC também possibilita o planeamento e a gestão das zonas costeiras, dada a importância económica e social que estas zonas têm vindo a demonstrar (Lima, 2018).

## 4.2. Cenário Base

### 4.2.1. Domínio de Cálculo

Para recorrer ao modelo numérico LTC foi necessário estipular um cenário base que definisse uma referência e permitisse comparar diferentes cenários de intervenção na zona de estudo. Para a definição do cenário base foram utilizados os dados obtidos na caracterização da agitação marítima e as coordenadas das linhas batimétricas e topográficas correspondentes ao litoral de Prado. Para caracterizar a agitação marítima, o LTC requiere informação sobre a altura de onda, respetivo período e direção. Como referido na seção 2.3.2, este tipo de dados foi recolhido no local entre 2014 e 2017, com registos espaçados de 3h, levando a uma recolha de 6995 dados, o que em contínuo representa um total 2.4 anos. Na perspetiva de proceder a simulações com um horizonte temporal de 10 anos, procedeu-se a uma repetição destes mesmos dados até atingir o intervalo de tempo exigido (Figura 20), aumentando a extensão da série de agitação a utilizar no programa LTC. Assim foram gerados 29 200 dados, o equivalente a 10 anos, com intervalos de registos de 3 horas.

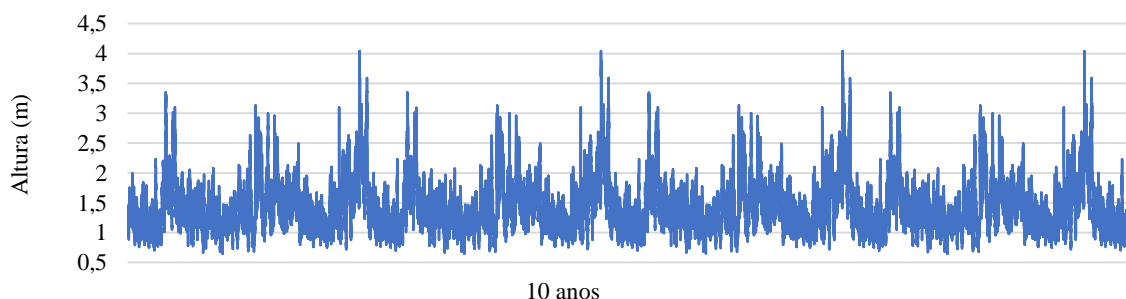


Figura 20: Altura de onda projetada para a simulação de 10 anos, com base em registos passados

Para proceder à modelação numérica pretendida também é necessário caracterizar a topo-hidrografia do local em estudo e, portanto, esta informação deve ser fornecida no início da execução do modelo LTC. A topo-hidrografia foi gerada através da carta náutica apresentada na secção 2.5, com base no modelo GRIDGEN (*Grid Generator*), um módulo do modelo GENESIS (Lima, 2018). Esta aplicação permite importar toda a informação da batimetria e da topografia da área a modelar e construir grelhas de pontos da área de estudo, com espaçamentos regulares, resultando assim numa grelha de 49000 x 24000 m<sup>2</sup>, com um espaçamento de 50 m, correspondendo a uma área de 981 x 481 pontos (Figura 21).

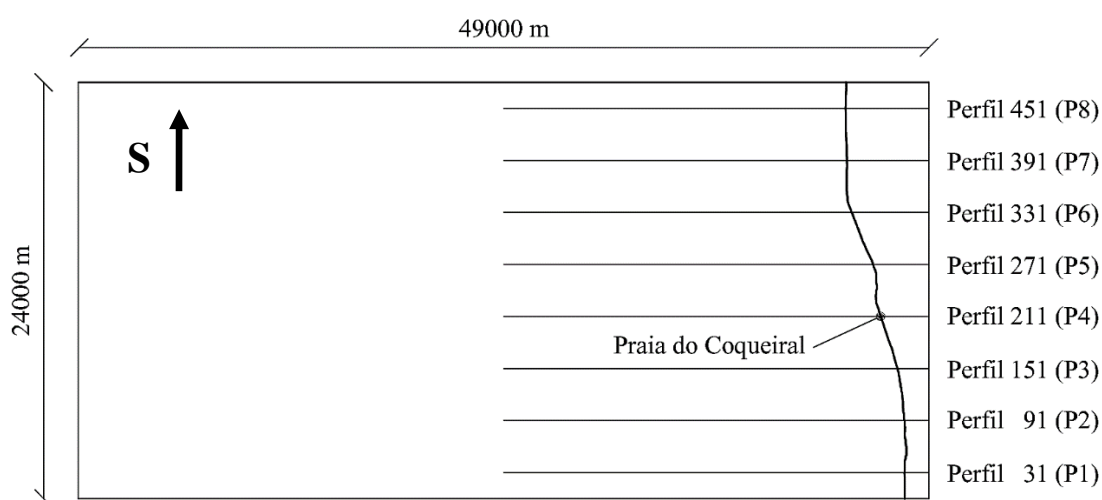


Figura 21: Linha de costa dividida em 8 perfis com um espaçamento de 3 km, no sentido da deriva litoral de Prado

Além da definição da grelha de cálculo, também é essencial estipular as condições fronteira a que vai estar sujeito o modelo e a localização da zona de estudo. Em relação às condições fronteira, a introdução de dados divide-se na definição dos volumes de sedimentos na fronteira norte e na fronteira sul da área a modelar, podendo-se seleccionar um das três opções: 1) volume fixo de sedimentos a entrar ou a sair da secção que define a fronteira; 2) taxa fixa de erosão ou acreção na secção; 3) extrapolação das condições na vizinhança da fronteira, baseado na média dos volumes em transporte nas secções adjacentes à fronteira (Lima, 2018), sendo, neste caso, a última opção a ser seleccionada.

Relativamente à zona de estudo, foi estipulado que seria centrada na área de rutura da linha de costa, ocorrida em 2013, tendo uma extensão de 13 500 m da linha de costa a sul e de 10 500 m a norte. O modelo LTC considera o oceano à esquerda da área modelada, pelo que foi necessário aplicar uma inversão do mapa da linha de costa, considerando o norte

direcionado para a parte inferior da zona modelada. A área de estudo foi dividida em seções de controlo, com o intuito de existir um perfil que caracteriza a seção de estudo referida anteriormente (rotura da linha de costa), tendo sido proposta uma distância de 3000 m entre cada perfil de forma a igualar os seus espaçamentos e de 1500 m para o início do primeiro perfil, dando origem a oito seções. A partir da Figura 21 visualiza-se o número de perfis existentes na grelha de cálculo e as respetivas designações, destacando o perfil 211 (P4) como o correspondente à seção de estudo.

#### 4.2.2. Calibração

Como referido anteriormente, o modelo numérico inclui duas formulações para a estimativa do transporte sólido longitudinal, a de CERC (SPM, 1984) e a de Kamphuis *et al.* (1986), em que o utilizador pode optar por uma das duas soluções disponíveis. Neste caso, a expressão de CERC foi a selecionada, cujo coeficiente empírico de transporte  $k$  representa um meio de calibração para a simulação de cenários.

Existindo diversas propostas para a definição do parâmetro  $k$ , foram estipulados vários coeficientes desde  $k = 0.02$  a  $k = 0.08$ , para um período de simulação de 5 e de 10 anos, tendo em conta o controlo dos caudais sólidos em transporte e das taxas de variação da posição da linha de costa nas seções de estudo (Figura 21), de forma a tentar reproduzir a evolução da linha de costa ao longo do tempo. Ao averiguar os resultados obtidos, os coeficientes de transporte  $k = 0.06$  e  $k = 0.08$  apresentavam caudais sólidos elevados e desajustados da realidade do local, optando-se assim pela comparação de dois  $k$ , 0.02 e 0.04, para um horizonte temporal de 10 anos.

Segundo a Tabela 1 e conforme as respetivas seções de estudo (P1 a P8), pode-se verificar o transporte de sedimentos que ocorre nas duas direções, norte-sul e sul-norte, e os correspondentes caudais sólidos líquidos/brutos (diferença entre os sedimentos que cruzam a seção nos dois sentidos e total de sedimentos que cruzam a seção, respetivamente) e as taxas de recuo e acreção em cada seção de controlo.

Tabela 1: Resultados da calibração, para os coeficientes  $k$  de 0.02 e de 0.04

|          |    | N - S<br>(x10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /ano) | S - N<br>(x10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /ano) | Q <sub>bruto</sub><br>(x10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /ano) | Q <sub>líquido</sub><br>(x10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /ano) | Taxa de<br>reco (m/ano) | Taxa de<br>acrecção (m/ano) |
|----------|----|---|---|--|--|-------------------------|-----------------------------|
| k = 0.02 | P1 | 141.8   | 27.1  | 168.9  | 114.6  | 2.04                    | -                           |
|          | P2 | 125.6   | 30.9  | 156.5  | 94.7   | 0.20                    | -                           |
|          | P3 | 146.2   | 21.1  | 167.3  | 125.1  | 0.18                    | -                           |
|          | P4 | 190.1   | 6.4   | 196.5  | 183.6  | 3.05                    | -                           |
|          | P5 | 181.5   | 13.9  | 195.4  | 167.6  | 0.96                    | -                           |
|          | P6 | 153.2   | 26.2  | 179.4  | 127.0  | 5.89                    | -                           |
|          | P7 | 128.4   | 26.1  | 154.5  | 102.3  | -                       | 4.86                        |
|          | P8 | 126.2   | 33.8  | 160.0  | 92.5   | 4.31                    | -                           |
| k = 0.04 | P1 | 273.3   | 70.5  | 343.9  | 202.8  | 3.41                    | -                           |
|          | P2 | 241.4   | 72.7  | 314.0  | 168.7  | 0.61                    | -                           |
|          | P3 | 291.4   | 47.6  | 339.0  | 243.8  | -                       | 0.20                        |
|          | P4 | 360.7   | 18.8  | 379.5  | 342.0  | 10.10                   | -                           |
|          | P5 | 342.2   | 39.9  | 382.1  | 302.2  | 2.93                    | -                           |
|          | P6 | 300.2   | 67.0  | 367.2  | 233.2  | 6.86                    | -                           |
|          | P7 | 261.6   | 54.0  | 315.6  | 207.7  | -                       | 4.71                        |
|          | P8 | 253.3   | 76.0  | 329.3  | 177.3  | 5.10                    | -                           |

Ao analisar os resultados, verifica-se que existe um maior transporte sedimentar referente ao  $k = 0.04$ , nomeadamente na direção norte-sul, em que ambos os cenários apresentam um aumento dos caudais sólidos desde a seção P1 até ao P4 e de seguida um decréscimo até ao P8. Tendo em conta as taxas de variação da posição da linha de costa, é de notar que existe uma diferença no P3 entre os dois cenários, em que houve uma alteração de uma taxa de reco para uma de acreção, salientando também que os valores correspondentes ao  $k = 0.04$  são superiores ao cenário de  $k = 0.02$ , principalmente na seção de estudo (P4). Considera-se que os resultados obtidos com  $k = 0.02$  são mais representativos da zona de estudo, pelo que se optou por  $k = 0.02$ .

Apesar da opção escolhida, verificou-se que o padrão de transporte sedimentar longitudinal não correspondia com a realidade, apresentando um maior caudal sólido no sentido norte-sul, que, segundo as considerações anteriores (seção 2.4, Figura 13a), deveria ocorrer no sentido contrário, representando desse modo a deriva litoral pertencente a Prado. Assim sendo, verificou-se que os dados de agitação marítima retirados da boia “Praia do Forte”, referidos na seção 2.3.2., não reproduziam no modelo o sentido de transporte sólido esperado. Portanto, de forma a obter o padrão de transporte longitudinal pretendido, foram realizados novos cenários, fixando a altura e o rumo das ondas e mantendo os respetivos valores constantes ao longo da simulação. Na Tabela 2 e na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos para o transporte sedimentar e para as taxas de variação da posição da

linha de costa de cada seção de controlo, considerando alturas de onda de 1 m e de 1.5 m, conjugadas com orientações da agitação de 105°, 110° e 115° com o sul (no sentido anti-horário).

Tabela 2: Transporte sedimentar para alturas de onda de 1 m e de 1.5 m

|           |      |       | Transporte Sedimentar ( $\times 10^3 \text{ m}^3/\text{ano}$ ) |       |       |      |      |      |       |       |
|-----------|------|-------|--|-------|-------|------|------|------|-------|-------|
|           |      |       | P1   | P2    | P3    | P4   | P5   | P6   | P7    | P8    |
| H = 1 m   | 105° | N - S | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 4.0  | 25.1 | 1.8  | 0.0   | 0.0   |
|           |      | S - N | 37.8   | 42.1  | 20.7  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 49.6  | 49.3  |
|           | 110° | N - S | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0  | 10.4 | 0.5  | 0.0   | 0.0   |
|           |      | S - N | 50.8   | 54.3  | 35.0  | 10.0 | 0.0  | 1.1  | 60.5  | 60.9  |
|           | 115° | N - S | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0  | 1.2  | 0.0  | 0.0   | 0.0   |
|           |      | S - N | 61.9   | 64.3  | 48.1  | 24.5 | 5.7  | 13.5 | 69.0  | 70.3  |
| H = 1.5 m | 105° | N - S | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 15.6 | 79.6 | 0.0  | 0.0   | 0.0   |
|           |      | S - N | 89.1   | 127.5 | 76.3  | 0.0  | 0.0  | 0.7  | 97.7  | 109.4 |
|           | 110° | N - S | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 0.6  | 43.6 | 0.0  | 0.0   | 0.0   |
|           |      | S - N | 125.1  | 158.9 | 112.8 | 12.7 | 0.0  | 4.7  | 131.6 | 144.5 |
|           | 115° | N - S | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0  | 9.0  | 0.0  | 0.0   | 0.0   |
|           |      | S - N | 156.8  | 184.3 | 145.6 | 50.6 | 6.6  | 20.3 | 165.2 | 174.8 |

Tabela 3: Taxas de variação da posição da linha de costa para alturas de onda de 1 m e de 1.5 m

|           |      |         | Taxas (m/ano) |      |       |      |       |      |      |      |
|-----------|------|---------|---------------|------|-------|------|-------|------|------|------|
|           |      |         | P1            | P2   | P3    | P4   | P5    | P6   | P7   | P8   |
| H = 1 m   | 105° | Erosão  | 1.56          | 0.06 | -     | 2.48 | 10.64 | 1.11 | -    | 2.27 |
|           |      | Acreção | -             | -    | 6.12  | -    | -     | -    | 8.94 | -    |
|           | 110° | Erosão  | 1.49          | 0.04 | -     | 3.69 | 10.71 | 3.73 | -    | 2.21 |
|           |      | Acreção | -             | -    | 5.66  | -    | -     | -    | 7.96 | -    |
|           | 115° | Erosão  | 1.41          | 0.02 | -     | 2.58 | 10.52 | 0.04 | -    | 2.13 |
|           |      | Acreção | -             | -    | 4.97  | -    | -     | -    | 6.85 | -    |
| H = 1.5 m | 105° | Erosão  | 1.55          | 0.25 | -     | 4.55 | -     | 5.04 | -    | 1.87 |
|           |      | Acreção | -             | -    | 13.02 | -    | 15.66 | -    | 0.90 | -    |
|           | 110° | Erosão  | 1.41          | 0.22 | -     | 3.33 | -     | 5.33 | -    | 1.86 |
|           |      | Acreção | -             | -    | 12.11 | -    | 14.76 | -    | 0.43 | -    |
|           | 115° | Erosão  | 1.25          | 0.16 | -     | 0.84 | -     | 5.52 | -    | 1.86 |
|           |      | Acreção | -             | -    | 10.56 | -    | 15.20 | -    | 0.81 | -    |

Procedeu-se também à análise dos resultados de simulações com os registos de altura e período de onda variável ao longo dos 10 anos, mantendo, no entanto, a orientação da agitação fixa num valor constante de 100°, 120°, 125° e 130° (no sentido anti-horário). Os resultados obtidos para estes cenários são apresentados na Tabela 4 e na Tabela 5.

Tabela 4: Transporte sedimentar para alturas e períodos de onda variáveis e direções fixas

|                              |      |       | Transporte Sedimentar ( $\times 10^3 \text{ m}^3/\text{ano}$ ) |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------------------|------|-------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                              |      |       | P1   | P2    | P3    | P4    | P5    | P6    | P7    | P8    |
| Alturas e Períodos variáveis | 110° | N - S | 27.1   | 11.8  | 23.5  | 19.5  | 71.1  | 44.2  | 3.4   | 18.4  |
|                              |      | S - N | 122.9  | 127.1 | 114.0 | 43.2  | 51.6  | 82.0  | 160.9 | 155.1 |
|                              | 120° | N - S | 15.2   | 5.3   | 16.5  | 9.2   | 41.8  | 34.5  | 0.6   | 5.6   |
|                              |      | S - N | 164.0  | 172.8 | 161.6 | 103.0 | 69.5  | 118.1 | 205.8 | 197.4 |
|                              | 125° | N - S | 7.9  | 2.8   | 12.1  | 4.9   | 35.3  | 29.7  | 0.1   | 0.3   |
|                              |      | S - N | 183.4  | 197.5 | 181.8 | 131.9 | 87.0  | 135.5 | 218.5 | 216.6 |
|                              | 130° | N - S | 2.2  | 0.6   | 5.1   | 2.1   | 30.3  | 24.4  | 0.0   | 0.0   |
|                              |      | S - N | 205.2  | 216.8 | 201.1 | 158.4 | 104.9 | 153.2 | 224.0 | 225.3 |

Tabela 5: Taxas de variação da posição da linha de costa para alturas e períodos de onda variáveis e direções fixas

|                              |      |         | Taxas (m/ano) |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------|------|---------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|
|                              |      |         | P1            | P2   | P3   | P4   | P5   | P6   | P7   | P8   |
| Alturas e Períodos variáveis | 110° | Erosão  | 2.20          | 0.45 | 1.17 | 8.68 | 3.70 | 6.86 | -    | 3.83 |
|                              |      | Acreção | -             | -    | -    | -    | -    | -    | 2.67 | -    |
|                              | 120° | Erosão  | 1.83          | 0.37 | 1.24 | 3.35 | 3.32 | 5.26 | -    | 2.87 |
|                              |      | Acreção | -             | -    | -    | -    | -    | -    | 2.89 | -    |
|                              | 125° | Erosão  | 1.72          | 0.30 | 0.95 | 3.07 | 3.15 | 5.80 | -    | 2.43 |
|                              |      | Acreção | -             | -    | -    | -    | -    | -    | 2.05 | -    |
|                              | 130° | Erosão  | 1.42          | 0.15 | 0.11 | 2.81 | 2.77 | 5.65 | -    | 0.98 |
|                              |      | Acreção | -             | -    | -    | -    | -    | -    | 0.90 | -    |

Para facilitar a compreensão dos resultados, a análise foi efetuada através da comparação do transporte de sedimentos entre os mesmos rumos com alturas diferentes e, posteriormente, comparado com os dados retirados da boia, aplicando o mesmo processo para as taxas de variação da posição da linha de costa dos diferentes cenários.

Segundo a Tabela 2, nos dois cenários com alturas diferentes ( $H = 1 \text{ m}$  e  $H = 1.5 \text{ m}$ ) e ao comparar cada perfil, averigua-se que o transporte de sedimentos diminui no sentido norte-sul (P4 a P6) e aumenta no sentido contrário (em todos os perfis), à medida que o ângulo, que representa a orientação de proveniência da onda, amplia. Para cada cenário de agitação, em todos os perfis, observa-se que o transporte de sedimentos ocorre no mesmo sentido ao longo de toda a simulação, existindo, no entanto, quatro exceções referentes aos rumos 110° e 115°, em que ocorre transporte sedimentar nas duas direções (perfis P5 e P6 e perfis P4 e P5, para as alturas de  $H = 1 \text{ m}$  e  $H = 1.5 \text{ m}$ , respectivamente), sendo destacados a cor verde na Tabela 2. Considerando o perfil da seção de estudo (P4), o cenário testado com uma altura de onda de 1.5 m e um rumo de 115°, revela um transporte superior na direção sul-norte, quando comparado com os restantes cenários.

Ao considerar as alturas de onda obtidas na boia, alterando apenas o rumo de incidência da onda, apresentam-se os resultados de transporte sedimentar, expostos na Tabela 4. Pode-se concluir que estes cenários apresentam o mesmo tipo de variação de transporte de sedimentos, em que existe um aumento dos caudais sólidos na direção sul-norte e uma redução no sentido contrário, à medida que o rumo de onda aumenta. Considerando o perfil de estudo (P4), a Tabela 4 apresenta um transporte sedimentar superior no cenário com um rumo de 130°, na direção sul-norte.

Como os rumos testados não são idênticos entre os diversos acontecimentos, alturas de onda estipuladas e dados variáveis da boia, a análise desenvolvida incluiu as taxas de variação da posição da linha de costa ocorridas em cada perfil, ao longo dos 10 anos de simulação. Neste caso, as taxas de variação da posição da linha de costa num dos cenários ( $H = 1$  m) apresentam significativa variabilidade, passando a efetuar-se uma observação mais ampla.

Salientando o perfil de estudo, a Tabela 3 indica que este apresenta sempre taxas de erosão, independentemente da altura de onda e respetivo rumo, sendo a mais reduzida referente ao cenário cuja altura de onda é de 1.5 m, com um rumo de 115°. Ainda próximo da seção de estudo, os perfis P3 e P5 mostram áreas de acreção consoante a altura de onda, ou seja, quando o cenário implica uma altura de onda de 1.5 m, as taxas de acreção ocorrem nos dois perfis adjacentes a P4. Contudo, com uma altura de 1 m, a situação de acreção somente se manifesta em P3, apresentando elevados valores de erosão em P5. No caso da Tabela 5, pode averiguar-se que P4 tem o mesmo comportamento erosivo que os cenários anteriores, cuja redução das taxas sucede à medida que o rumo de onda vai aumentando. Destaca-se o rumo de 130°, com uma menor taxa de erosão, apesar das zonas adjacentes a essa não apresentarem áreas de acreção, que ocorre exclusivamente em P7.

Da análise desenvolvida, foram referidos dois cenários, representando cada parâmetro pelos quais eram avaliados. No caso das taxas de variação da posição da linha de costa, destacou-se o cenário com uma altura de onda de 1.5 m e um rumo de 115°, enquanto que, em relação ao transporte sedimentar, foi o cenário de alturas e períodos variáveis, com um rumo de 130°, que apresenta melhores resultados.

Comparando os dois casos, é de notar que o cenário  $H = 1.5$  m, apresenta na seção de estudo uma reduzida taxa de erosão e um transporte de sedimentos inferior ao do segundo cenário.



Assim sendo, optou-se pelo cenário cujas alturas e períodos são adquiridos da boia, com o rumo da agitação no ângulo de  $130^\circ$ , estipulando o cenário base para um intervalo de tempo de 10 anos. Os testes de cenários demonstrados no capítulo seguinte serão comparados com este cenário, considerado como cenário de referência.



## **Capítulo 5**

### **CENÁRIOS TESTADOS**



## 5. Cenários Testados

Neste capítulo vão ser apresentadas diversas simulações, em conjunto com intervenções de defesa costeira, com o intuito de entender o comportamento da linha de costa em função das diferentes opções, de modo a escolher a intervenção mais apropriada para o problema de erosão ocorrido no local de estudo.

### 5.1. Definição dos Cenários

Devido ao número de simulações efetuadas com diversas obras de defesa costeira, cada cenário elaborado é descrito e identificado com uma sigla própria, juntamente com as respetivas condições utilizadas na definição da simulação, facilitando a leitura das tabelas de resultados obtidos e a sua extensão.

#### 5.1.1. Esporão (L)

O esporão foi uma das obras de defesa costeira avaliada devido à sua função em reter o transporte longitudinal de sedimentos, originando uma maior área de acreção na zona em questão, ao acumular as areias transportadas no sentido sul-norte. Sendo assim, foram simulados nove cenários de esporões, conjugando três diferentes comprimentos (200, 300 e 400 m) e três posições em relação ao perfil de estudo (distância de 200, 400 e 600 m a sul do perfil P4).

- Para uma distância de 200 m, com comprimentos de 200 m (L<sub>200\_200</sub>), 300 m (L<sub>300\_200</sub>) e 400 m (L<sub>400\_200</sub>);
- Para uma distância de 400 m, com comprimentos de 200 m (L<sub>200\_400</sub>), 300 m (L<sub>300\_400</sub>) e 400 m (L<sub>400\_400</sub>);
- Para uma distância de 600 m, com comprimentos de 200 m (L<sub>200\_600</sub>), 300 m (L<sub>300\_600</sub>) e 400 m (L<sub>400\_600</sub>).

Os resultados da simulação destes nove cenários podem ser visualizados na Figura 22 para a posição da linha de costa ao fim de 10 anos, cujas áreas de erosão e de acreção são identificadas a vermelho e a verde, respetivamente, entre os perfis P3 e P5.

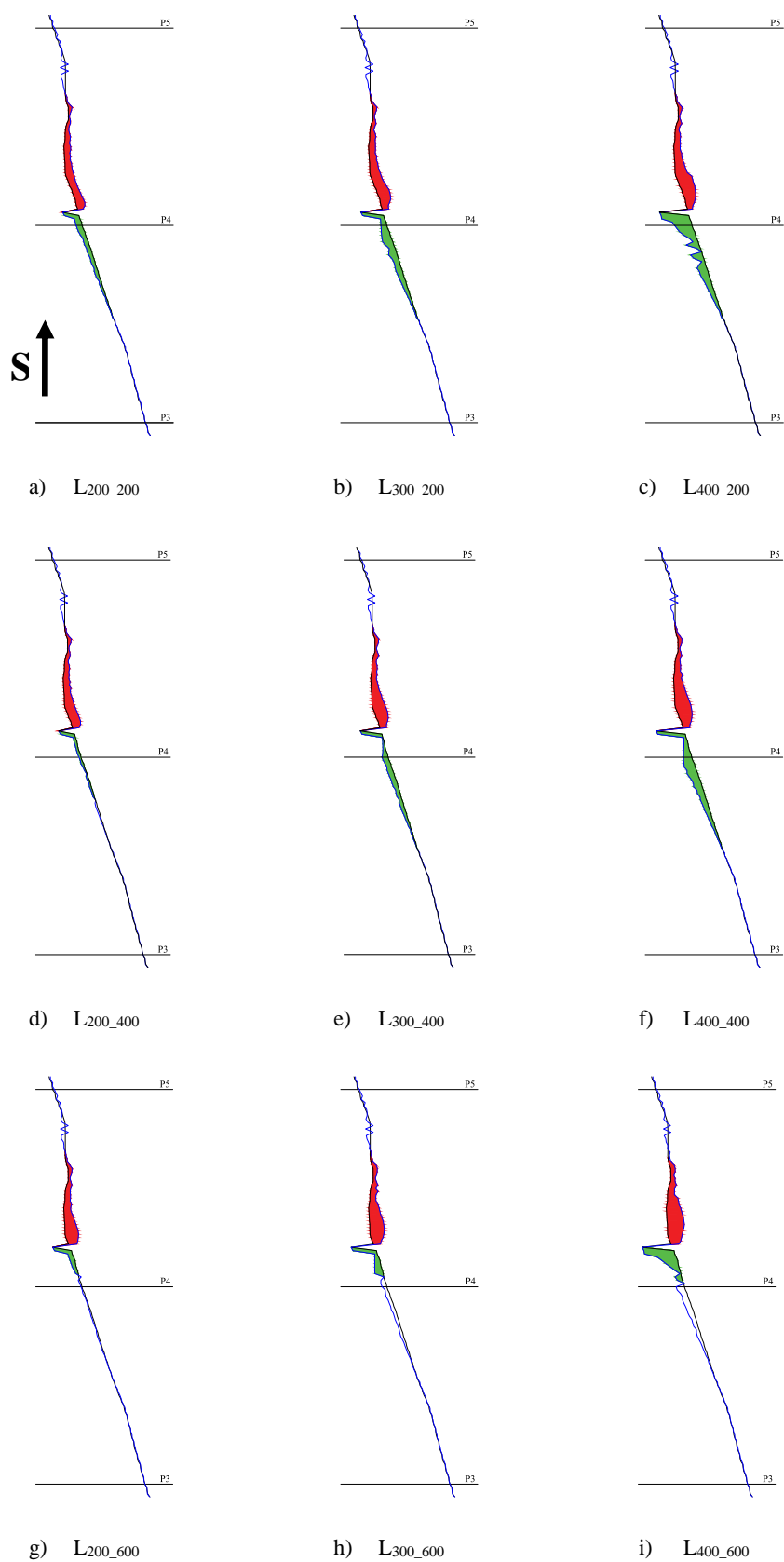


Figura 22: Resultado da simulação de esporões, ao fim de 10 anos

De acordo com o critério selecionado para a limitação das áreas de acreção e erosão, é possível verificar que, nos últimos cenários de esporões (Figura 22g, Figura 22h e Figura 22i), as áreas de acreção contabilizadas não se estendem até ao perfil de estudo (P4), apesar da indicação de uma variação positiva da posição da linha de costa nesse perfil, pois a área de acreção é interrompida por uma pequena área de erosão, localizada a sul. Contudo, através da simulação destes cenários, pode-se concluir que os esporões apresentam impactos positivos na seção de estudo, independentemente do comprimento e da localização da estrutura.

### 5.1.2. Obra Longitudinal Aderente (OLA)

A obra longitudinal aderente é uma estrutura utilizada para a dissipação da energia das ondas, evitando a erosão e fixando a posição da linha de costa no local de intervenção. No entanto, a erosão propaga-se na zona vizinha à obra. Para a simulação das obras longitudinais aderentes foram testados três cenários, com comprimentos de 200 m (OLA<sub>200</sub>), de 300 m (OLA<sub>300</sub>) e de 400 m (OLA<sub>400</sub>), cujo eixo da obra localiza-se a 400 m do perfil de estudo (P4), em todos os cenários. Na Figura 23 estão representados os resultados dos cenários simulados, sendo as cores a vermelho e a verde correspondentes às zonas de erosão e acreção, respetivamente (representação entre os perfis P3 e P5).

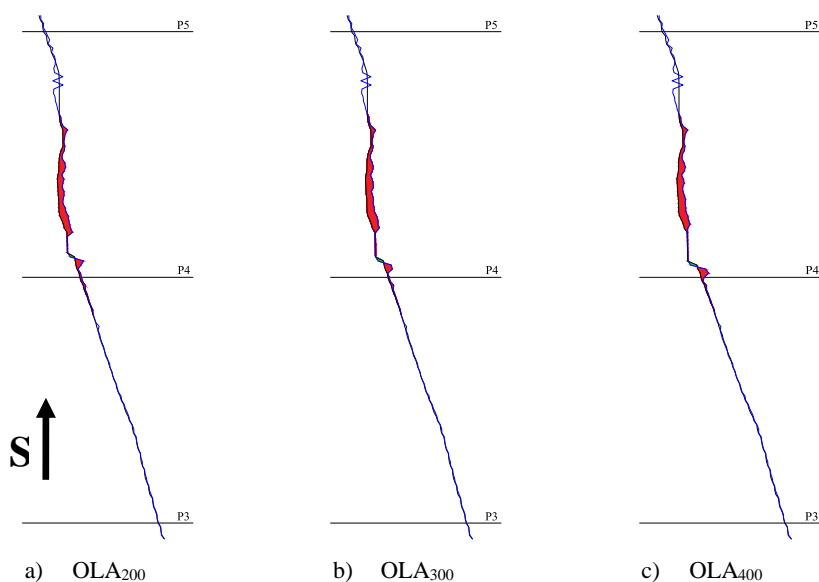


Figura 23: Resultado da simulação de obras longitudinais aderentes, ao fim de 10 anos

A simulação das obras longitudinais aderentes demonstra que, em todos os casos, existe erosão na seção de estudo, que aumenta de dimensão com o comprimento da estrutura.

### 5.1.3. Esporão + Obra Longitudinal Aderente

Por vezes os esporões e as obras longitudinais aderentes são conjugados, tentando potenciar os efeitos positivos de cada tipo de intervenção. Neste caso, projetaram-se três cenários com o esporão localizado a 400 m do perfil P4, mantendo o comprimento do esporão, com 200 m e localizando uma obra longitudinal aderente imediatamente a sul do esporão, com comprimentos variáveis:

- Esporão de 200 m + Obra Longitudinal Aderente de 200 m ( $L_{200}+OLA_{200}$ )
- Esporão de 200 m + Obra Longitudinal Aderente de 300 m ( $L_{200}+OLA_{300}$ )
- Esporão de 200 m + Obra Longitudinal Aderente de 400 m ( $L_{200}+OLA_{400}$ )

Os resultados das simulações podem ser visualizados na Figura 24, onde as áreas a vermelho indicam erosão e as de acreção são representadas a verde, entre P3 e P5.

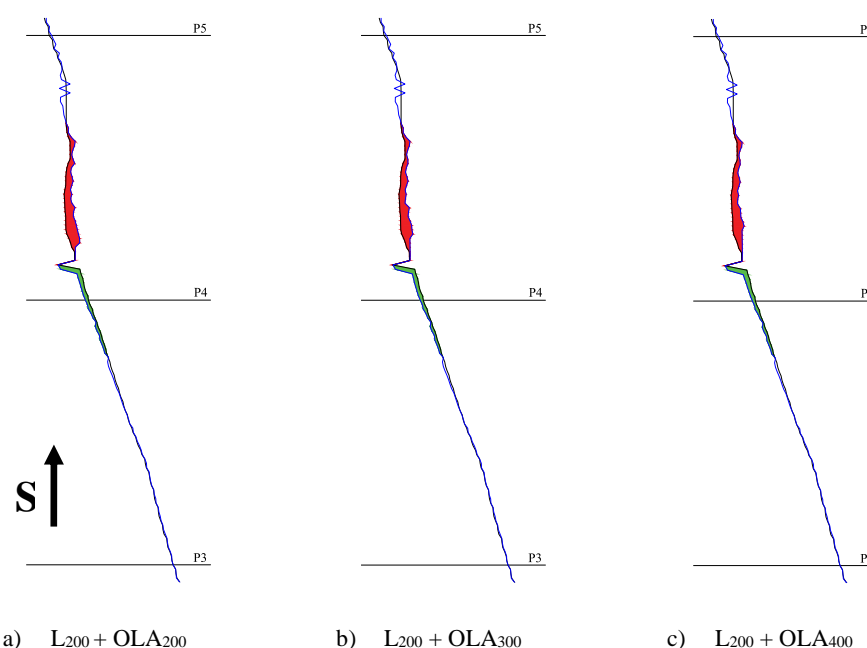


Figura 24: Resultado da simulação de esporões com obras longitudinais aderentes, ao fim de 10 anos

Nesta simulação pode-se concluir que a conjugação entre esporões e obras longitudinais aderentes apresenta um impacto positivo no perfil de estudo (P4), com um aumento da área de acreção nessa zona e uma redução da área de erosão localizada a sul das estruturas, podendo-se confirmar na seção 5.2.



#### 5.1.4. Alimentação Pontual (AP)

A alimentação pontual corresponde a uma simulação de uma fonte aluvionar, pelo que se simulam os efeitos das fontes sedimentares naturais que possam existir no local de estudo (eventuais sedimentos provenientes do rio Jucuruçu). Neste caso foram testadas duas situações correspondentes à alimentação na seção de estudo ( $AP_{SE}$ ) e na foz antiga ( $AP_{FOZ}$ ) do rio Jucuruçu. Em cada local de alimentação foram simulados dois cenários, com um caudal sólido de sedimentos de  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  e de  $20 \text{ m}^3/\text{h}$ . Na Figura 25 estão representados os resultados das simulações, em que são identificados os locais de alimentação e as respectivas áreas de erosão (vermelho) e de acreção (verde), entre os perfis P3 e P5.

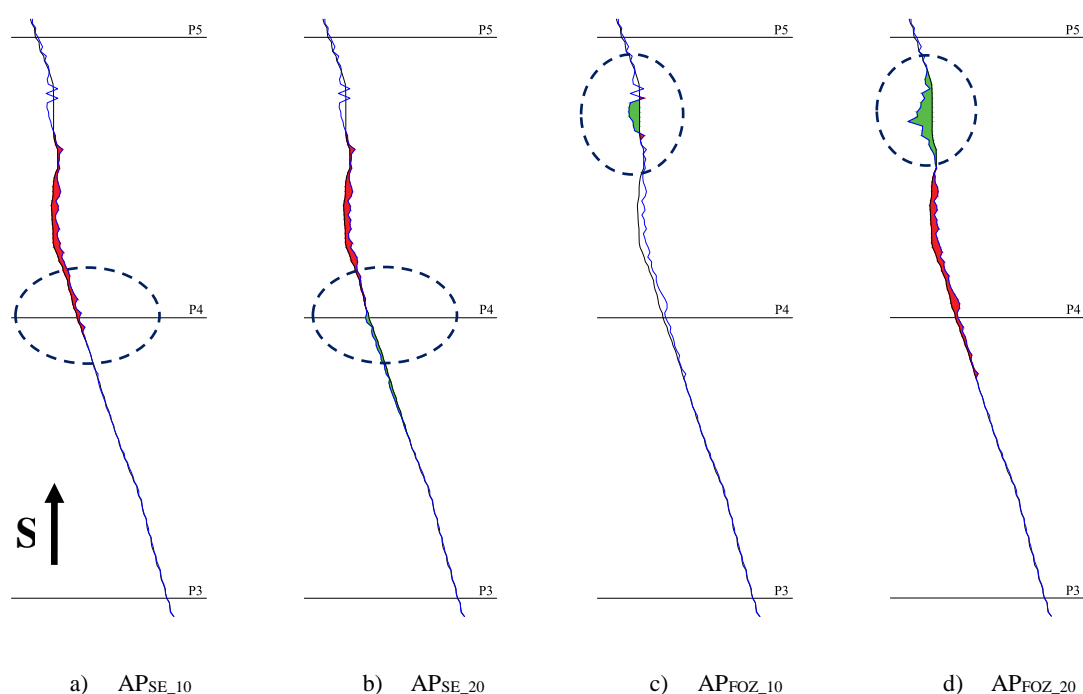


Figura 25: Resultado da simulação de alimentações pontuais, ao fim de 10 anos

Dos quatro cenários simulados, apenas um apresenta acreção no perfil P4, em que a alimentação pontual é efetuada na seção de estudo, mostrando ainda elevadas zonas de erosão nos restantes cenários. Verifica-se que os cenários, em que a alimentação pontual foi efetuada na foz do rio Jucuruçu, apresentam áreas de acreção significativas, originando áreas de erosão imediatamente a norte e a sul da foz, de pequenas (Figura 25c) e maiores dimensões (Figura 25d), causando impactos negativos em P4.

### 5.1.5. Alimentação Artificial (AA)

A alimentação artificial implica uma adição de areia, proveniente de fora do sistema costeiro, protegendo o local de intervenção, mantendo o valor recreativo das praias e beneficiando ainda outras praias a sotamar, ao longo do tempo. Esta intervenção necessita de uma fonte de sedimentos próxima que permita a realização de intervenções de forma recorrente no tempo e sem aumentar os custos de modo excessivo.

Para isso, foram simulados dois cenários de alimentação artificial com uma área de 1000 m x 400 m, centrada no perfil P4. Num dos cenários foram efetuadas 10 alimentações com um volume de 100 000 m<sup>3</sup>/ano, realizando uma alimentação no primeiro mês de cada ano (AA<sub>1</sub>). No segundo cenário apenas foi efetuada uma alimentação ao longo do primeiro ano de simulação, com um volume de 1 000 000 m<sup>3</sup> (AA<sub>2</sub>). A Figura 26 apresenta os resultados obtidos nas simulações, entre os perfis P3 e P5, identificando os respectivos locais de alimentação, as áreas de erosão, de cor vermelha, e as de acreção, de cor verde.

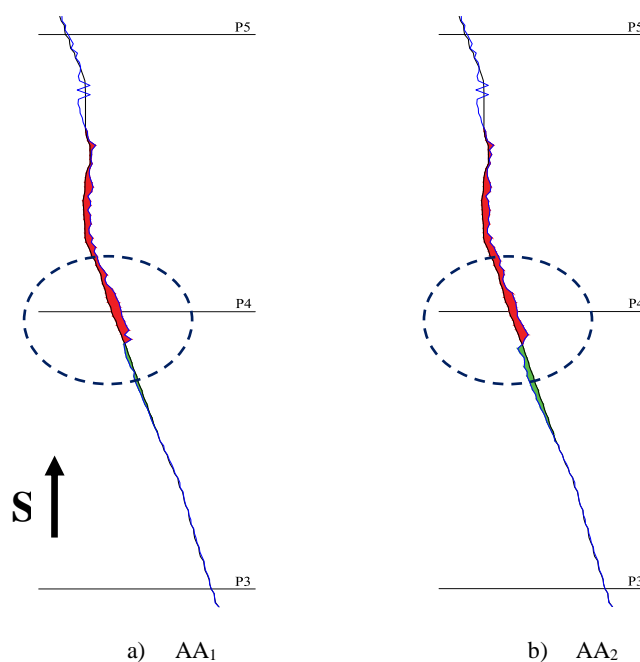


Figura 26: Resultado da simulação de alimentações artificiais, ao fim de 10 anos

Apesar da realização das alimentações artificiais, os dois cenários testados apresentam erosão na região do perfil P4, independentemente do número de alimentações, mostrando um ligeiro aumento da área de acreção no cenário que representa uma alimentação ao longo do primeiro ano de simulação (Figura 26b).

## 5.2. Resultados

Após a simulação dos diversos cenários foram adquiridos os valores descritos na Tabela 6, correspondentes a áreas de erosão e acreção, à variação da posição da linha de costa ( $\Delta P$ ) e ao caudal sólido em P4. Estes resultados permitem compreender a interligação entre as diferentes intervenções e as diferentes componentes a que foram sujeitas, comparando assim as situações de modelo utilizadas nos cenários testados.

Para isso foi efetuada uma análise entre estruturas do mesmo tipo, indicando as diversidades encontradas, de modo a destacar qual a mais adequada dentro desses parâmetros. Sendo assim, neste subcapítulo, vai ser apresentada uma descrição dos resultados obtidos pelo programa LTC, correspondente a cada conjunto de cenários testado.

Tabela 6: Resultados dos diferentes cenários (áreas de erosão/acreção e comportamento do perfil P4)

| Cenários                             | Área<br>(x10 <sup>3</sup> m <sup>2</sup> /ano) |         | P4                    |  |
|--------------------------------------|--|---------|-----------------------|--|
|                                      | Erosão   | Acreção | $\Delta P$<br>(m/ano) | Q <sub>líquido</sub><br>(x10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /ano) |
| L <sub>200_200</sub>                 | 14.4   | 8.7     | 9.0                   | 111.7  |
| L <sub>300_200</sub>                 | 18.1   | 13.8    | 8.6                   | 90.7   |
| L <sub>400_200</sub>                 | 19.8   | 20.9    | 26.3                  | 64.1   |
| L <sub>200_400</sub>                 | 13.9   | 3.9     | 2.9                   | 120.9  |
| L <sub>300_400</sub>                 | 16.4   | 10.4    | 9.5                   | 94.9   |
| L <sub>400_400</sub>                 | 18.7   | 16.6    | 5.7                   | 78.5   |
| L <sub>200_600</sub>                 | 14.0   | 3.4     | 1.2                   | 124.0  |
| L <sub>300_600</sub>                 | 16.5   | 4.8     | 7.2                   | 104.1  |
| L <sub>400_600</sub>                 | 20.4   | 10.1    | 12.7                  | 92.1   |
| OLA <sub>200</sub>                   | 9.4  | 0.2     | -2.0                  | 143.9  |
| OLA <sub>300</sub>                   | 9.7  | 0.2     | -1.7                  | 119.4  |
| OLA <sub>400</sub>                   | 9.1  | 0.2     | -3.6                  | 137.3  |
| L <sub>200</sub> +OLA <sub>200</sub> | 10.1   | 4.1     | 3.3                   | 120.8  |
| L <sub>200</sub> +OLA <sub>300</sub> | 9.4  | 4.1     | 3.3                   | 120.8  |
| L <sub>200</sub> +OLA <sub>400</sub> | 9.2  | 4.2     | 3.3                   | 120.8  |
| AP <sub>SE_10</sub>                  | 8.5  | 0       | -2.2                  | 154.2  |
| AP <sub>SE_20</sub>                  | 6.9  | 2.6     | 3.7                   | 151.8  |
| AP <sub>FOZ_10</sub>                 | 0.2  | 2.9     | -2.8                  | 156.2  |
| AP <sub>FOZ_20</sub>                 | 9.9  | 8.5     | -2.8                  | 156.1  |
| AA <sub>1</sub>                      | 12.1   | 1.7     | -9.4                  | 137.9  |
| AA <sub>2</sub>                      | 12.8   | 3.8     | -8.4                  | 138.5  |

A Tabela 6 apresenta apenas os resultados do perfil de estudo (P4), sendo os restantes cenários apresentados na Figura 27, através de gráficos.

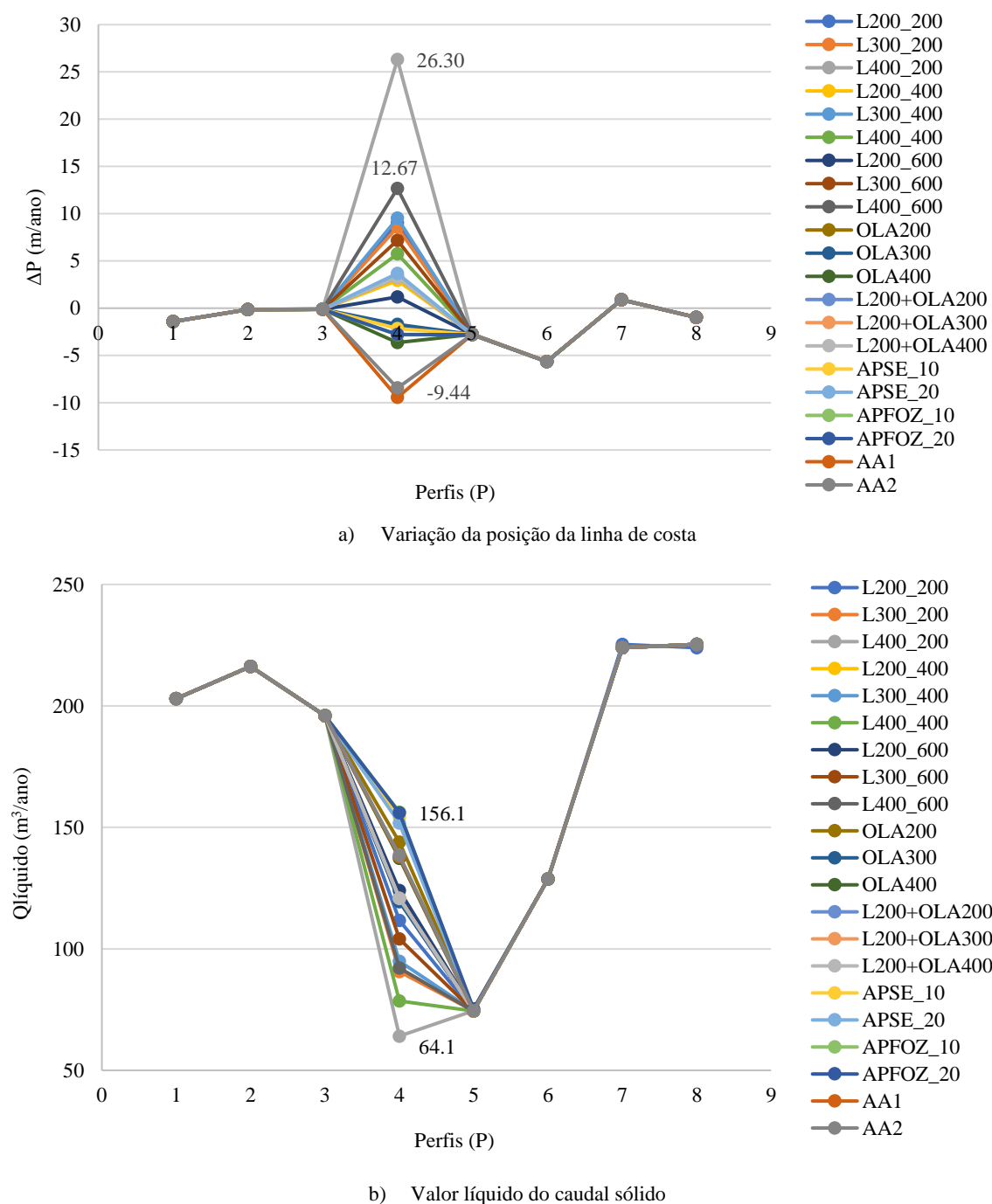


Figura 27: Resultados de todos os cenários simulados, ao fim de 10 anos

Dos gráficos representados verifica-se que, em todas as simulações, a posição da linha de costa e o caudal líquido sofrem alterações a partir do P3 até ao P5, mantendo os valores constantes ao longo dos outros perfis de controlo. Estes resultados indicam que o comportamento do litoral nas zonas mais afastadas de intervenção são independentes dos cenários testados.

Conforme a Tabela 6, o primeiro conjunto de resultados corresponde aos dos esporões, diferenciando o seu comprimento e a distância da intervenção à zona de estudo. Tendo em conta o comprimento dos esporões, é possível averiguar que, à medida que este vai aumentando, o transporte sedimentar líquido é menor, indicando uma redução no caudal sólido, independentemente da distância a que se encontra a estrutura. A Tabela 6 mostra que ambas as áreas de erosão e de acreção vão aumentando consoante o comprimento do esporão, o que corresponde a um maior impacto das maiores estruturas, apresentando uma variação positiva da posição da linha de costa na zona do P4. No entanto, o aumento do comprimento do esporão resulta em maiores áreas de erosão a sotamar, que vão diminuindo em relação às áreas de acreção.

Considerando a localização do esporão, observa-se que quanto mais afastado da zona do P4 este for, mais o caudal sólido aumenta, representando a passagem de uma maior quantidade de sedimentos no perfil de estudo. A Tabela 6 indica que a variação positiva da posição da linha de costa vai diminuindo com a distância, resultando também numa menor área de acreção. Também é possível verificar que as áreas de erosão diminuem entre os cenários de 200 e 400 m de distância, mostrando de seguida um incremento entre os cenários de 400 e 600 m, enquanto que as áreas de acreção vão reduzindo com o aumento da distância, como referido anteriormente. Com estes cenários conclui-se que, à medida que os esporões aumentam de comprimento, a diferença entre as áreas de erosão e de acreção reduz, assim como as taxas de recuo da posição da linha de costa no perfil P4.

O posterior conjunto de cenários engloba as obras longitudinais aderentes, simuladas com o eixo localizado a 400 m da seção de estudo, com a extensão a variar entre os 200 e os 400 m. Averigua-se que o transporte de sedimentos não apresenta uma evolução constante conforme o aumento da dimensão da intervenção, havendo um menor caudal sólido entre os 200 e os 300 m e uma maior quantidade entre os 300 e os 400 m, tal como nas áreas de erosão, que são superiores nos primeiros comprimentos testados. No entanto, as áreas correspondentes à acreção mantêm-se conforme o comprimento da obra longitudinal aderente, não sendo o suficiente para uma variação positiva da posição da linha de costa, indicando apenas um reduzido avanço quando se passa do cenário de 200 para o de 300 m, constantemente numa situação de erosão.

Os cenários seguintes conjugam duas intervenções, abrangendo esporões e obras

longitudinais aderentes, localizados a 400 m a sul de P4, mantendo o comprimento do esporão com 200 m e variando os da obra longitudinal aderente entre os 200 e os 400 m. Conforme no conjunto de cenários anterior, a variação da posição da linha de costa apresenta indícios de erosão, cujas áreas diminuem consoante o crescimento do comprimento da obra longitudinal aderente, enquanto as áreas de acreção se mantêm similares nos cenários de 200 m e de 300 m, aumentando ligeiramente no cenário de 400 m. Em relação à quantidade de sedimentos que cruza o perfil de estudo, averigua-se que vai reduzindo até ao cenário  $L_{200}+OLA_{300}$ , tendo um ligeiro incremento no último cenário do conjunto.

Foram simuladas duas situações de uma alimentação pontual, uma na seção de estudo (SE) e outra na foz antiga do rio Jucuruçu (FOZ), como referido no subcapítulo anterior, variando ainda o caudal de sedimentos inserido no sistema. Neste caso, a observação de resultados pode efetuar-se através de dois critérios, pelo local onde se realiza a alimentação e pelo volume de sedimentos introduzido. Segundo a localização da alimentação, verifica-se que existe um maior caudal sedimentar líquido no cenário efetuado na foz antiga, tendo uma diferença de aproximadamente  $100 \text{ m}^3/\text{ano}$  entre o volume de sedimentos de  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  e de  $20 \text{ m}^3/\text{h}$ , e uma de  $2400 \text{ m}^3/\text{ano}$  relativamente ao cenário que introduz os sedimentos na seção de estudo.

No geral apresenta áreas de erosão e de acreção superiores quando comparadas com as efetuadas na seção de estudo, mostrando também uma maior variação negativa da posição da linha de costa. No entanto, como se pode observar na Tabela 6, existe ainda um cenário associado a uma variação positiva, com um volume de sedimentos de  $20 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $AP_{SE\_20}$ ). Considerando os volumes de sedimentos que foram definidos para a simulação, existem valores superiores referentes ao volume de  $10 \text{ m}^3/\text{h}$ , nomeadamente no cenário com alimentação na foz antiga, sendo possível averiguar a significativa diferença entre os cenários  $AP_{SE}$  e  $AP_{FOZ}$  correspondentes às áreas de acreção e de erosão.

Por fim, o último conjunto de cenários testados foi dividido em dois acontecimentos, que depende do número de alimentações ocorridas num ano. No primeiro cenário foram simuladas 10 alimentações, decorrendo uma no primeiro mês de cada ano, com um volume de  $100\,000 \text{ m}^3/\text{ano}$ , enquanto que o segundo cenário corresponde apenas a uma alimentação realizada durante todo o primeiro ano, de  $1\,000\,000 \text{ m}^3$ . Relativamente à quantidade de sedimentos no perfil de estudo, este segundo cenário apresenta valores superiores aos do

primeiro cenário, assim como maiores áreas de erosão e de acreção. Porém, ambos mostram uma elevada variação negativa da posição de linha de costa, indicando que não serão as intervenções mais adequadas para a situação de estudo.

### 5.3. Discussão

Após uma análise mais pormenorizada de cada conjunto de cenários em função do tipo de intervenção, procedeu-se para um método de eliminação tendo em conta dois parâmetros de controlo dos resultados analisados, o caudal sedimentar a cruzar a seção de estudo (P4) e as taxas de variação da posição da linha de costa na mesma seção.

Genericamente, é possível observar que as únicas intervenções de defesa costeira, com uma variação positiva da posição da linha de costa, são os esporões, com comprimentos e posições diferentes, o conjunto de esporões com as obras longitudinais aderentes e a alimentação pontual efetuada na seção de estudo, com um volume de sedimentos de  $20 \text{ m}^3/\text{h}$ . Perante este cenário e numa perspetiva de minimizar um problema de erosão localizado, eliminaram-se todos os cenários que não contribuem para a resolução da erosão no perfil de estudo, restando apenas dez intervenções como cenários possíveis para escolha.

Das treze intervenções, apenas a alimentação pontual apresenta um maior transporte sólido total na seção de estudo, de  $151.8 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{ano}$ , com uma taxa de acreção da posição da linha de costa de  $3.68 \text{ m/ano}$ . Contudo, pode-se confirmar que o conjunto de esporões exhibe valores superiores na variação da posição da linha de costa, nomeadamente nos cenários de  $L_{400\_200}$  e de  $L_{400\_600}$ . Considerando ainda as taxas de variação da posição da linha de costa, verifica-se ainda que o  $L_{300\_400}$  é o que apresenta uma maior taxa entre os resultados considerados com valores aceitáveis (sem influência de instabilidades numéricas), representando uma possível estrutura costeira para mitigar o comportamento erosivo do local em estudo.

Assim sendo, considera-se dois possíveis cenários de intervenção de defesa costeira, um esporão com um comprimento de 300 m, localizado a 400 m do perfil de estudo, e uma alimentação pontual nessa mesma região, com um volume de sedimentos de  $20 \text{ m}^3/\text{ano}$ .

A alimentação pontual depende de uma fonte sedimentar aluvionar, o que pode implicar dragagens ou limitações nos volumes de sedimentos disponíveis, causando potenciais

impactos ao longo do tempo e custos elevados em períodos de recarga curtos. Quanto ao esporão, este retém as areias a barlar durante um intervalo de tempo, agravando o processo de erosão a sotamar da obra, até atingir o seu limite de retenção e igualar o déficit sedimentar existente. Das desvantagens apresentadas pelos dois tipos de intervenção, considera-se que a alimentação pontual é uma solução mais dependente das condições naturais, que apresentam maiores incertezas, enquanto o esporão é uma obra executada para um maior horizonte temporal, podendo ser adaptado às condições envolventes, em função do seu desempenho no tempo.

Sendo assim, optou-se pela construção de um esporão com um comprimento de 300 m, posicionado a 400 m a sul de P4, que segundo a simulação obtém uma taxa de acreção média no tempo de 9.52 m/ano, durante um intervalo de tempo de 10 anos.



## **Capítulo 6**

# **DIMENSIONAMENTO DE INTERVENÇÕES**



## 6. Dimensionamento de Intervenções

O objetivo da presente dissertação é desenvolver uma solução capaz de mitigar o problema de erosão que ocorre na zona de Prado, em Bahia, tendo em conta os resultados obtidos no capítulo 5, sugerindo um esporão com 300 m de comprimento, localizado a 400 m a sul do perfil de estudo (Figura 28). Neste capítulo pretende-se desenvolver o estudo para o dimensionamento do esporão, nomeadamente no que se refere à caracterização da seção transversal da estrutura.

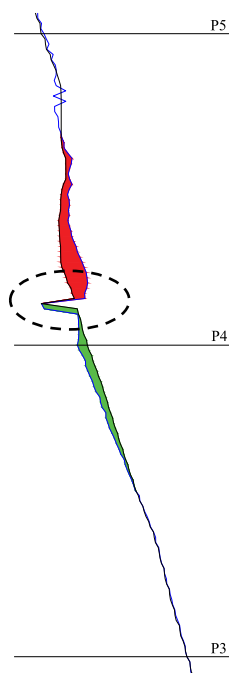


Figura 28: Localização do esporão adotado, localizado a 400 m da seção de estudo

### 6.1. XD-COAST (*Xpress Design of COAstal Structures*)

XD-Coast é um programa de pré-dimensionamento da seção transversal de estruturas costeiras, baseado em formulações empíricas, cujos parâmetros envolvidos influenciam os resultados obtidos, sendo uma ferramenta de cálculo automático que facilita a compreensão dessa influência nos cálculos e a comparação de várias soluções para a seção transversal das estruturas costeiras (Lima, 2018).

Considerando ainda as características da seção transversal das estruturas a dimensionar, o modelo XD-Coast inclui formulações para o cálculo da largura de coroamento, da espessura das camadas do manto resistente e dos filtros e do número de blocos por unidade de área,

permitindo também o cálculo do peso unitário dos blocos a colocar no manto resistente, de acordo com três tipos de obra (não galgáveis, galgáveis e submersas). Devido à diversidade de parâmetros que influenciam o peso dos blocos e à dependência dos resultados consoante o tipo de obra e formulação em causa, o XD-Coast permite o cálculo para situações isoladas e a análise de sensibilidades dos resultados aos diferentes parâmetros envolvidos, facilitando assim uma rápida comparação das diversas formulações e dos resultados de cada formulação em função das diversas variáveis (Lima, 2011).

## **6.2. Dimensionamento**

Para o dimensionamento de estruturas de defesa costeira é essencial ter em conta a agitação marítima, devido ao conjunto de ações que produz sobre as intervenções, que advém das ondas, marés, correntes e ventos obtidos no local de estudo, devendo ser concebidas de modo a resistirem às ações a que estão sujeitas durante o seu período útil. Para Lima (2011), um dimensionamento adequado deverá passar por diversas fases, sendo conveniente uma caracterização das ações, a realização de um pré-dimensionamento, baseado em fórmulas empíricas, e ainda a construção de modelos reduzidos de forma a testar as soluções obtidas no pré-dimensionamento. No presente trabalho vão ser contempladas duas fases, a da caracterização das ações, nomeadamente do clima de agitação, já referido no capítulo 2, e a fase do pré-dimensionamento através do programa XD-Coast, estando interligadas ao longo do processo.

Nos cenários avaliados no capítulo 5, optou-se por um esporão com 300 m de comprimento, localizada a uma distância de 400 m do perfil de estudo. Os esporões são estruturas perpendiculares à linha de costa, executadas normalmente em blocos de enrocamento, blocos de betão, cortinas de estacas-prancha metálicas ou em madeira, projetados para reter os sedimentos transportados longitudinalmente (Coelho, 2005). Segundo Taveira-Pinto e Neves (2003), existem diversos métodos de dimensionamento para este tipo de estruturas de defesa costeira e consistem, basicamente, em diferentes fórmulas para a determinação do peso dos blocos do respetivo manto resistente, que deverá resistir às solicitações a que está sujeita. Das solicitações a que a estrutura vai estar submetida, a onda é o fenómeno mais influente e, portanto, afeta diretamente a estabilidade da estrutura, podendo levar à queda, deslocamento ou rotura dos blocos e consequentemente, por vezes, ao respetivo

desmoronamento. Por esse motivo é importante efetuar uma análise da agitação marítima, considerando parâmetros como a altura da onda, o período e a direção, uma vez que a superfície livre do mar é composta por ondas de variadas alturas e períodos, movendo-se em diferentes direções.

No entanto, devido à complexidade da ação da agitação marítima, em conjunto com a forma de alguns blocos constituintes do manto resistente e da disposição aleatória no local de estudo, torna-se praticamente impossível o cálculo rigoroso das forças atuantes nos blocos. Assim sendo, utilizam-se fórmulas de estabilidade baseadas em resultados teóricos e ensaios em modelos reduzidos, que permitem uma estimativa do peso dos blocos necessário para resistir à ação da onda de projeto (Ceccarelli, 2009). Recomenda-se, por isso, a sua aplicação essencialmente na fase de pré-dimensionamento, devendo, se possível, efetuar-se ensaios em modelo ou basear em resultados de experiências anteriores para o dimensionamento final da estrutura, caso se justifique.

Como referido na seção 6.1, as formulações a utilizar não dependem do tipo de obra quanto à sua forma (esporões, quebramares, etc.) mas quanto à sua relação com a superfície livre da água (galgáveis, não galgáveis e submersas), influenciando assim a escolha da formulação mais adequada para o pré-dimensionamento da estrutura.

### **6.3. Peso dos Blocos do Manto Resistente**

Para iniciar o pré-dimensionamento de uma estrutura é necessário escolher o tipo de obra mais adequada à situação em causa e definir a sua seção transversal de acordo com o meio ambiente envolvente, de forma a resistir às ações da agitação marítima, estando assim dependente do cálculo de peso dos blocos do manto exterior da estrutura.

De seguida são apresentadas duas formulações para cálculo do manto resistente do esporão. Face às considerações das duas fórmulas, verifica-se que a primeira (Hudson) introduz poucas variáveis no cálculo, estando dependente das decisões do projetista, sendo um método mais simples, enquanto que a segunda fórmula (van der Meer) considera diversos parâmetros representativos de uma agitação irregular, e, portanto, é mais realista, mas simultaneamente mais complexa.

### 6.3.1. Fórmula de Hudson

De entre várias formulações disponíveis na literatura, destaca-se a fórmula de Hudson (1) como a fórmula mais simples para o cálculo do peso dos blocos do manto resistente, apenas válida para estruturas permeáveis e não galgáveis,

$$W = \frac{\gamma \times H^3}{K_D \times \left( \frac{\gamma - \gamma_w}{\gamma_w} \right)^3 \times \cot \theta} \quad (1)$$

onde  $W$  representa o peso unitário dos blocos constituintes do manto resistente,  $H$  corresponde à altura de onda de projeto,  $\gamma$  e  $\gamma_w$  indicam o peso volúmico do material dos blocos (enrocamento) e o peso volúmico da água respetivamente,  $\theta$  indica o ângulo do talude com a horizontal e  $K_D$  representa o coeficiente de estabilidade, que depende de vários parâmetros que caracterizam a estrutura (tipo de bloco, permeabilidade, etc.).

A formulação de Hudson baseia-se em ensaios com ondas regulares, admitindo uma agitação marítima regular e, portanto, certos parâmetros hidrodinâmicos não são considerados relevantes na estabilidade do manto resistente (declividade da onda, a profundidade relativa, tipo de rebentação, etc.), assim como aspetos mais relacionados com as suas características (cota e largura do coroamento, a técnica de colocação dos blocos, etc.). Assim sendo, é considerado um método simplista devido às limitações impostas, caracterizando a agitação apenas pelo parâmetro “altura de onda” (Taveira-Pinto e Neves, 2003).

### 6.3.2. Fórmula de van der Meer

Considerando as limitações da formulação anterior, a fórmula de van der Meer surgiu de modo a suprimir essas falhas, baseando-se em ensaios com ondas irregulares e, portanto, permitindo uma caracterização mais realista da agitação marítima, válida para estruturas não galgáveis, galgáveis e submersas.

De acordo com Taveira-Pinto e Neves (2003), este método considera valores diferentes para o núcleo e para os filtros, diferentes condições de rebentação (oscilatória/mergulhante) e profundidades de água, e ainda diferentes níveis de danos, influenciados pela permeabilidade da estrutura. Contudo, não considera alguns parâmetros que advêm de uma agitação irregular, nomeadamente os diferentes modos de rotura, a profundidade da base da estrutura

e os efeitos tridimensionais na estabilidade e erosão na base e/ou a interação agitação/estrutura.

#### **6.4. Material do Manto Resistente**

Para um dimensionamento correto é essencial escolher o tipo de material mais adequado para o local de execução da obra devido às ações a que vai ser sujeita, expondo os materiais a processos de degradação e de resistência, sendo fundamental que a estrutura seja concebida para um extenso período de vida útil. A escolha de materiais influencia significativamente a longevidade de uma obra de defesa costeira, sendo cada vez mais baseada no conhecimento adquirido de experiências anteriores ao longo dos tempos, submetidas a diferentes climas de agitação e de diferentes materiais. Assim, a seleção do material depende de várias condicionantes, como a resistência, a durabilidade, a flexibilidade, a disponibilidade de aquisição do material, o custo associado, o manuseamento e manutenção requeridos, e os impactos ambientais que podem provocar (Lima, 2011).

A constituição do manto resistente de uma estrutura é usualmente composta por blocos de rocha (enrocamento) e/ou por blocos pré-fabricado de betão, estando também associados a outros materiais, como geotêxteis, areias ou argilas, para funções de filtragem ou drenagem e ainda para enchimento do núcleo da estrutura. Neste estudo optou-se por uma solução em blocos de enrocamento. Os blocos de enrocamento (Figura 29) são caracterizados pela sua forma irregular, normalmente utilizados na construção de obras de defesa costeira, tendo uma exposição muito clara às condições severas da agitação quando aplicados na camada superficial, devendo, por isso, apresentar uma boa qualidade quando adquiridos.

Para Guimarães (2012), os enrocamentos devem ter uma alta densidade, baixa porosidade e alta resistência, pressupondo que a previsão do comportamento deste material advém da análise desses três tópicos: permeabilidade, resistência mecânica e deformabilidade. No caso dos enrocamentos o estudo da permeabilidade, normalmente muito elevada, pode considerar-se secundário relativamente à resistência e deformabilidade, sendo possível, através de ensaios “*in-situ*” e em laboratório, determinar parâmetros que vão ser decisivos na adaptação do enrocamento a ser utilizado numa obra ou na seleção das pedreiras.



Figura 29: Esporão na praia do Furadouro (Irmãos Cavaco, 2006-2008)

De acordo com CIRIA (2007), o enrocamento apresenta várias vantagens quando comparado com outros materiais, relativamente às condicionantes referidas anteriormente:

- Durabilidade - o material rochoso tem uma maior resistência ao atrito e ao desgaste provenientes das ações das ondas e das marés;
- Absorção da energia das ondas - é refletida uma menor percentagem da energia da onda incidente, devido ao facto das rochas serem porosas e apresentarem faces arredondadas, reduzindo assim os fenómenos de erosão costeira e o efeito negativo provocado pela ação da onda na estrutura;
- Flexibilidade - o material rochoso apresenta uma maior adaptação ao meio envolvente, assim como a nível de deformações, adaptando-se facilmente a assentamentos da estrutura;
- Custo - o material pode ser adquirido nas proximidades do local de execução da obra, reduzindo assim os custos de transporte;
- Impacto visual - o enrocamento integra-se melhor na envolvente paisagística, diminuindo o impacto visual;
- Impactos ambientais - a utilização de enrocamento pode conduzir à minimização dos impactos negativos ambientais, devido à seleção de enrocamento com características geológicas similares às existentes na área de intervenção, permitindo a colonização de espécies locais pela fixação de habitats marinhos, que se previam extinguir com o efeito da construção da estrutura.



No entanto, segundo Neves (2013), existe uma grande limitação referente às dimensões do material rochoso, essencialmente pela disponibilidade dos recursos existentes e com pesos elevados, dificultando a possibilidade de extração e de transporte destes materiais.

### 6.5. Pré-dimensionamento

Foi proposta uma solução em enrocamento de pedra, com taludes de  $H/V = 1/1$  e de  $H/V = 3/2$ , cujo coroamento estará a uma cota de 2 m, acima do nível da água, com uma largura de 6 m, que será apresentada com mais detalhe ao longo desta seção. Ambas as formulações apresentadas anteriormente, são válidas para estruturas não galgáveis, enquanto apenas a fórmula de van der Meer é válida para os outros tipos de estruturas, galgáveis e submersas (Figura 30), sendo a formulação de van der Meer a mais adequada para o pré-dimensionamento, considerando um carácter irregular da agitação e mais realista.

No entanto, devido à falta de informação referente à agitação marítima na zona de Prado, como referido na seção 2.3.2, optou-se pela fórmula de Hudson, para testar uma estrutura não galgável, com uma cota de coroamento elevada, para a qual apenas ocorre galgamento em situações de temporal muito críticas, evitando danos na estrutura ao longo do tempo.

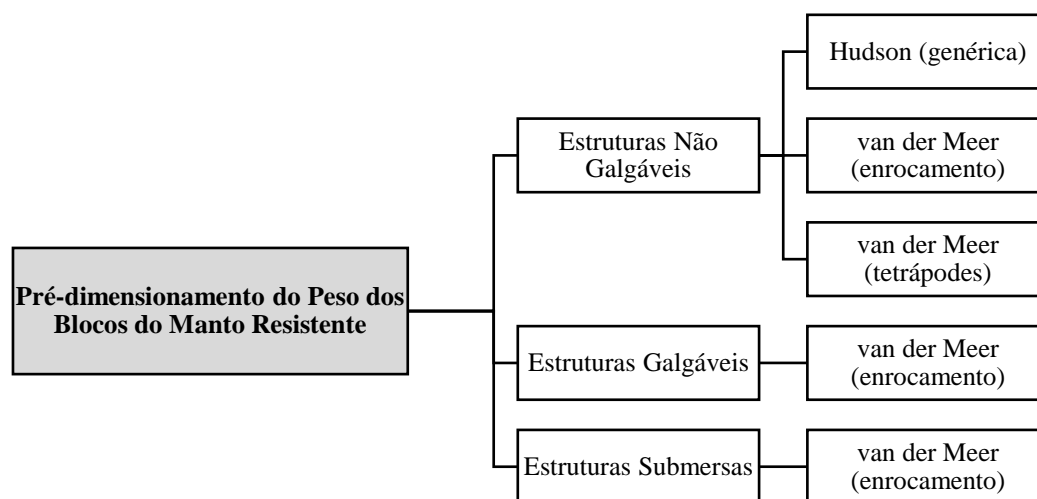


Figura 30: Formulações consideradas no programa XD-Coast

Segundo Lima *et al.* (2011), a ação das ondas sobre os taludes das estruturas não galgáveis é mais prejudicial comparativamente aos restantes tipos de obra, o que implica a necessidade de pesos maiores para os blocos do manto resistente. Assim, quanto maior for o peso volúmico do bloco, menor será o volume necessário para atingir um dado peso, havendo

assim uma redução da área exposta e um aumento na eficácia de cada bloco e, consequentemente, uma maior estabilidade da estrutura (Felgueiras, 2015). Tendo em conta estas considerações, a escolha do material para o manto resistente teria de englobar um estudo mais aprofundado, contudo, neste caso, foi sugerida como solução para manto exterior da estrutura, blocos de enrocamento, utilizando apenas este tipo de bloco para o pré-dimensionamento.

Como já foi referido, as formulações existentes permitem avaliar o peso dos blocos constituintes do manto resistente capaz de resistir à máxima altura de onda previsível no local da obra, atribuindo assim uma elevada importância à definição da agitação marítima. Segundo Taveira-Pinto e Neves (2003), a sua subavaliação poderá resultar num maior risco para a estrutura e consequente aumento do custo da obra, interferindo de forma direta na solicitação, no custo da construção e na segurança da obra marítima. Assim sendo, qualquer estrutura exposta à agitação, deverá ser dimensionada de modo a suportar o efeito da máxima onda previsível, tornando-se necessário definir, à partida, a altura de onda de projeto.

De acordo com Marinho (2013), a ordem de grandeza das várias profundidades que a estrutura atravessa ao longo da sua extensão, influencia o processo de cálculo da altura de onda de projeto, existindo diversos estudos que tentam estabelecer uma relação de compatibilidade entre os fundos e a altura das ondas, através da teoria de ondas solitárias. Para Taveira-Pinto (2001), o dimensionamento de obras em águas profundas e com elevados níveis de agitação é particularmente complexo, em que as alturas de onda máximas têm de ser associadas a períodos de retorno, constituindo um obstáculo na conceção destas, no caso de ausência de registos da agitação. Em relação às obras situadas em águas pouco profundas, as alturas de onda estão limitadas por condicionantes físicas relacionadas com a profundidade e a inclinação dos fundos da área de implantação, permitindo assim a rebentação das ondas maiores antes de atingirem a estrutura.

Segundo Smith (2003), McCowan (1891) determinou um índice de rebentação de profundidade adimensional, igual a 0.78, para uma onda solitária sobre um fundo horizontal, sendo um valor normalmente usado como primeira estimativa do índice. A propagação de ondas solitárias em águas pouco profundas apresenta forte similaridade com as ondas reais, sendo por este motivo utilizadas para representar os fenómenos próximos da costa (RBRH, 1999). No entanto, devido a várias limitações, sendo uma delas a consideração

de uma agitação de carácter regular, foram desenvolvidos estudos posteriores em que demonstraram que os índices de rebentação dependem de outros fatores, que não são relevantes para o presente trabalho.

Portanto, para o início do pré-dimensionamento, é necessário determinar o principal parâmetro, altura máxima de projeto ( $H_{m\acute{a}x}$ ), em função da profundidade da solução proposta na zona onde será implementada, a partir da equação (2):

$$H_{m\acute{a}x} = 0.78 \times d \quad (2)$$

Definida a altura de onda de projeto, será possível determinar o peso dos blocos de enrocamento do manto resistente da estrutura. De seguida, será apresentado o processo de cálculo para o dimensionamento final do esporão e os resultados obtidos através do programa XD-Coast.

#### 6.5.1. Parâmetros Considerados

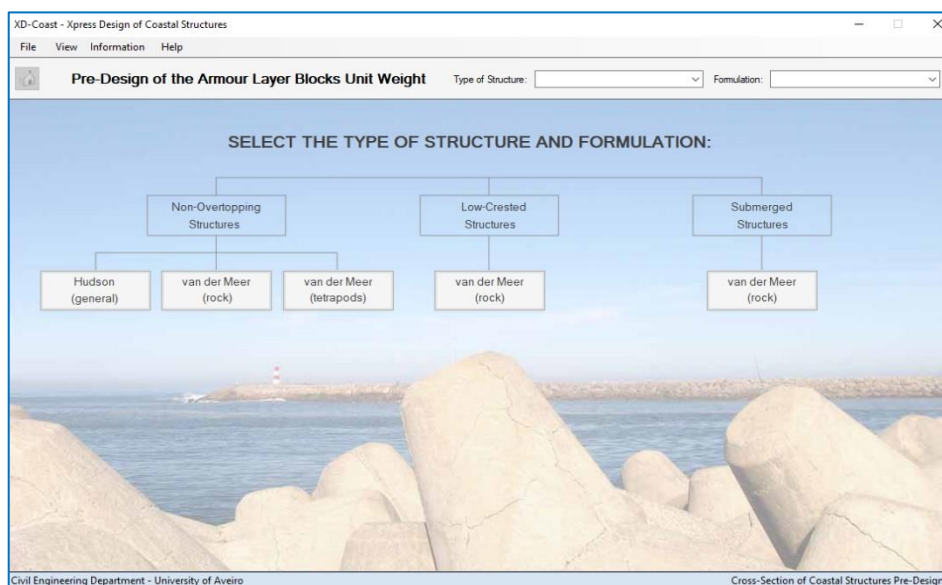
Nesta seção são apresentados todos os parâmetros fundamentais para o cálculo do peso dos blocos de enrocamento e posteriormente, para a definição da seção transversal do esporão, sendo inicialmente necessário definir a altura de onda em função da profundidade a que se localiza a cabeça da estrutura.

Pelo que foi estipulado, o esporão situa-se a 400 m do perfil de estudo, com um comprimento de 300 m, cuja cabeça localiza-se a cerca de 2.2 m de profundidade, sendo os restantes dados referidos na Tabela 7.

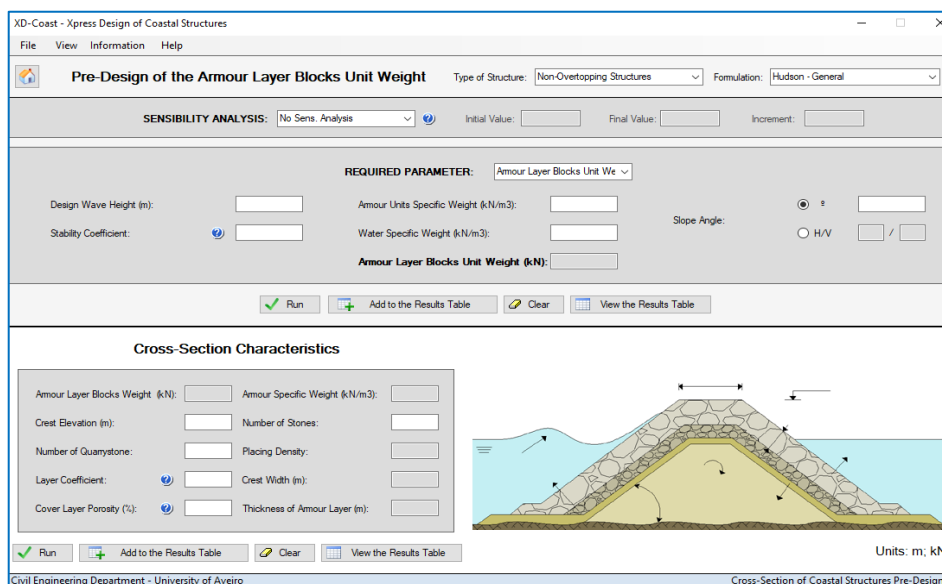
Tabela 7: Parâmetros considerados na aplicação da formulação de Hudson (estrutura não galgável)

| Parâmetros de Entrada                   | Valor | Un                |
|---|-------|-------------------|
| Altura de onda de projeto (H)           | 1.72  | m                 |
| Coeficiente de estabilidade ( $K_D$ )   | 3.5   | -                 |
| Peso volúmico dos blocos ( $\gamma_s$ ) | 26.5  | kN/m <sup>3</sup> |
| Peso volúmico da água ( $\gamma_w$ )    | 10.2  | kN/m <sup>3</sup> |
| Inclinação do talude ( $\theta$ )       | 1/1   | H/V               |
|   | 3/2   |                   |

A Tabela 7 representa os parâmetros que o programa XD-Coast considera quando selecionada uma estrutura não galgável, a partir da formulação Hudson (Figura 31), em que o utilizador preenche consoante a situação que esteja a analisar. A Figura 31a indica a janela inicial, na qual o utilizador seleciona o tipo de obra que quer executar e a fórmula pela qual vai dimensionar a estrutura, enquanto que a Figura 31b apresenta os parâmetros a preencher, conforme os dados referentes ao tipo de material, a altura de onda no local da obra e a certas características da estrutura que pretende, sendo expostas a seguir.



a) Janela inicial com as formulações correspondentes a cada tipo de obra



b) Janela de cálculo da formulação de Hudson para enrocamento (estrutura não galgável)

Figura 31: Janelas do programa XD-Coast

Para o caso em estudo, o manto resistente vai ser constituído por blocos de enrocamento correspondendo assim a um coeficiente de estabilidade,  $K_D$ , de 3.5, com um peso volúmico de  $26.5 \text{ kN/m}^3$ , equivalente a cerca de  $2.7 \text{ tf/m}^3$  (Ceccarelli, 2009). Os blocos vão ser dimensionados para resistir a uma altura de onda,  $H$ , de 1.72 m (resultado da aplicação da equação(2), considerando o peso volúmico da água de  $10.2 \text{ kN/m}^3$  (uma maior densidade da água salgada corresponde a uma situação mais desfavorável).

Em relação à inclinação do talude, por interpretação da fórmula de Hudson, é possível concluir que existe uma relação diretamente proporcional entre o peso dos blocos e a inclinação dos taludes, indicando que quanto mais suave for a inclinação dos taludes, menor o peso dos blocos e maior será a área ocupada pela estrutura na base (Marinho, 2013), como se pode comprovar na Tabela 8.

Tabela 8: Resultado da formulação de Hudson (estrutura não galgável), em função da inclinação do talude

| Inclinação do talude (°) | Peso unitário dos blocos (kN) |
|--------------------------|-------------------------------|
| 45                       | 9.441                         |
| 33.69                    | 6.294                         |

Na análise efetuada à Tabela 8, comprova-se que a estrutura com um maior peso dos blocos corresponde à maior inclinação do talude,  $\theta = 45^\circ$  (1/1), indicando uma redução da área ocupada, ou seja, uma menor largura na base da estrutura. Contudo, é essencial que os taludes tenham uma inclinação que minimize a probabilidade de ocorrência de galgamentos e, simultaneamente, rotura por deslizamento do terreno.

Para além dos parâmetros referidos anteriormente, o programa XD-Coast calcula também a seção transversal que se pretende executar (Figura 31b). Segundo Lima (2011), as características da seção transversal dividem-se em três grupos: largura de coroamento, espessura do manto resistente e número de blocos resistentes por unidade de área, dependentes do valor considerado para o peso volúmico do material e para o peso unitário dos blocos do manto resistente.

Os parâmetros de entrada, que são considerados no programa, estão representados na Tabela 9.

Tabela 9: Parâmetros para a definição da geometria da seção transversal

| Parâmetros de Entrada                | Valor     |   | Un |
|--------------------------------------|-----------|---|----|
| Cota de coroamento                   | 4.5       |   | m  |
| Número de camadas                    | 2         |   | -  |
| Coeficiente da camada                | 1.02      |   | -  |
| Porosidade da camada                 | 38        |   | %  |
| Número de blocos por unidade de área | H/V = 1/1 | 8 | -  |
|                                      | H/V = 3/2 | 9 |    |

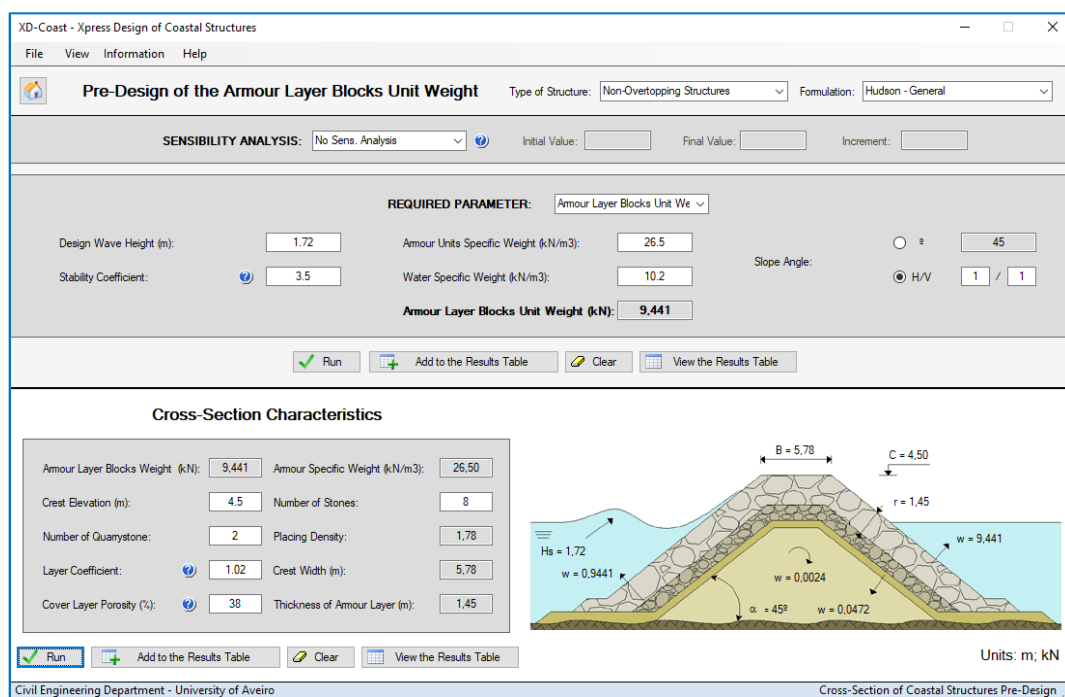
Pelo que é observado na Tabela 9, aplicou-se uma altura para a estrutura de 4.50 m, que advém da profundidade a que se localiza a cabeça do esporão (cota -2.20 m), juntamente com a cota de coroamento que se estipulou (+2.30 m), evitando assim galgamentos, que possam apenas ocorrer em situações severas de temporal. Este parâmetro influencia também a largura de coroamento, cujo valor será apresentado de seguida.

Em termos da espessura do manto resistente, esta depende do número de camadas de blocos constituintes, sendo aplicadas 2 camadas de blocos de enrocamento, usualmente utilizados na sua execução. No entanto, Pita (1986) aconselha 3 a 4 camadas para esse tipo de bloco e 2 camadas para blocos de betão. A espessura do manto resistente também depende do coeficiente de camada, que varia consoante o tipo de bloco utilizado, sendo neste caso considerados blocos de enrocamento com acabamento liso da superfície do talude, correspondendo a um coeficiente de 1.02.

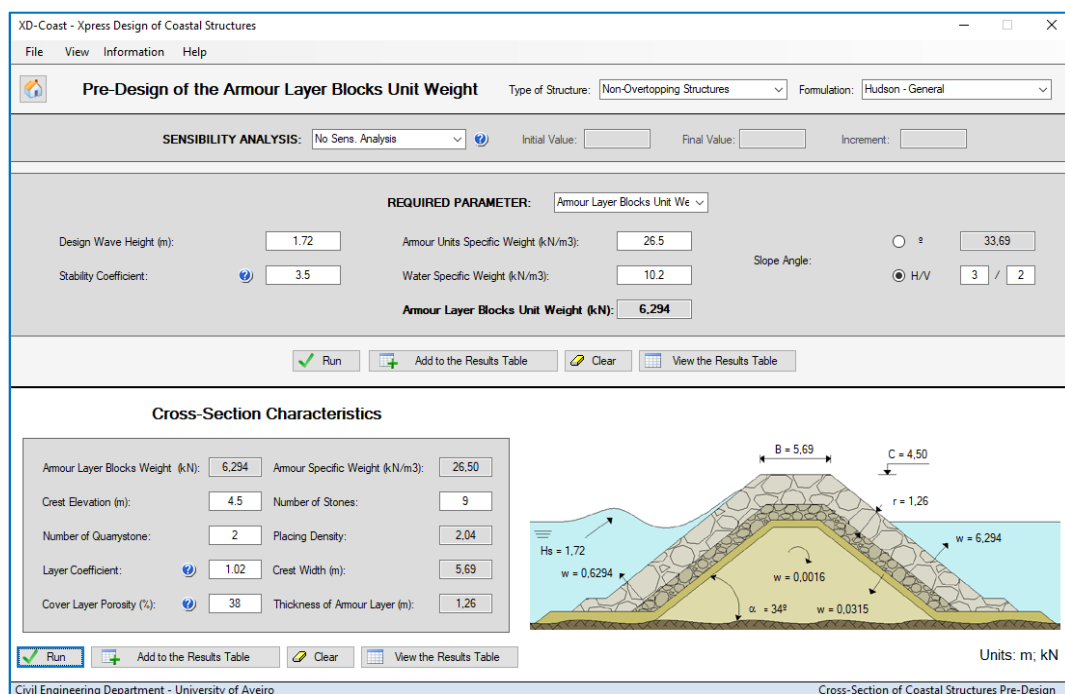
No caso do número de blocos por unidade de área, além dos parâmetros referidos na espessura do manto resistente, este depende da porosidade, variando conforme o tipo de bloco e o modo de colocação e imbricamento entre si. A porosidade é um parâmetro essencial no comportamento de uma estrutura, influenciando a dissipação de energia das ondas, que apenas ocorre na sua passagem pelos vazios existentes entre blocos, permitindo que ocorra uma maior dissipação da energia quando o manto resistente é muito poroso (Lima, 2011). Considera-se que o valor da porosidade da estrutura será de 38%, correspondente a blocos de enrocamento.

Como estipulado, foram testadas duas soluções, em que o único parâmetro a ser modificado é a inclinação do talude, variando entre  $H/V = 1/1$  e  $H/V = 3/2$ , influenciando assim os

valores do número de blocos por área, a largura de coroamento e a espessura do manto resistente, conforme apresentado na Figura 32.



a) Inclinação de talude de H/V = 1/1



b) Inclinação de talude de H/V = 3/2

Figura 32: Resultados do XD-Coast para diferentes inclinações de talude

A partir da Figura 32, é possível observar algumas diferenças entre os dois casos apresentados, nomeadamente no número de blocos e consequentemente na largura de coroamento da seção transversal e na espessura do manto exterior. Estas diferenças repercutem-se também no peso unitário dos blocos da subcamada, do núcleo e dos filtros (Tabela 10).

No primeiro caso,  $H/V = 1/1$ , foram aplicados 8 blocos, perfazendo uma largura de coroamento de 5.78 m (aproximadamente 6 m) e a colocação de 1.78 blocos por unidade de área, resultando num manto resistente com uma espessura de 1.45 m.

No segundo caso,  $H/V = 3/2$ , o número de blocos aumenta para 9, com 2.04 blocos por unidade de área, reduzindo a largura de coroamento para 5.69 m (mantendo-se aproximadamente os 6 m) e simultaneamente a espessura do manto resistente, 1.26 m.

Pela Tabela 10, observa-se mais uma vez a influência da inclinação do talude sob o peso unitário dos blocos, em que quanto mais elevado for a inclinação da estrutura, maior será o peso dos blocos constituintes.

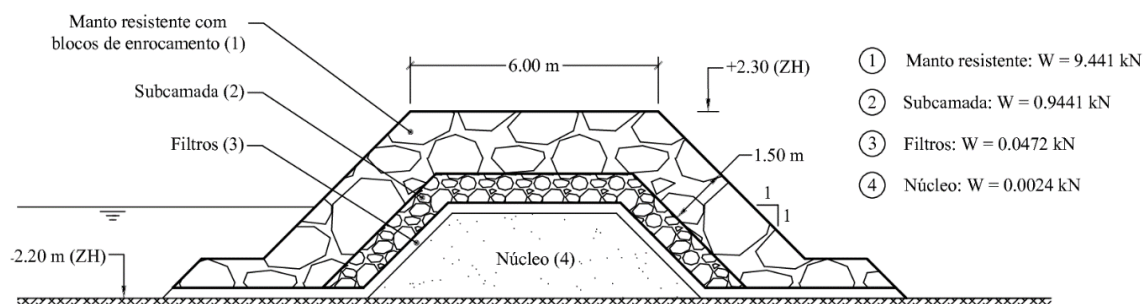
Tabela 10: Resultado dos pesos unitários dos blocos, em função da inclinação do talude

| H/V | Peso unitário dos blocos |        | Un |
|-----|--------------------------|--------|----|
| 1/1 | Blocos                   | 9.441  | kN |
|     | Subcamada                | 0.9441 | kN |
|     | Filtros                  | 0.0472 | kN |
|     | Núcleo                   | 0.0024 | kN |
| 3/2 | Blocos                   | 6.294  | kN |
|     | Subcamada                | 0.6294 | kN |
|     | Filtros                  | 0.0315 | kN |
|     | Núcleo                   | 0.016  | kN |

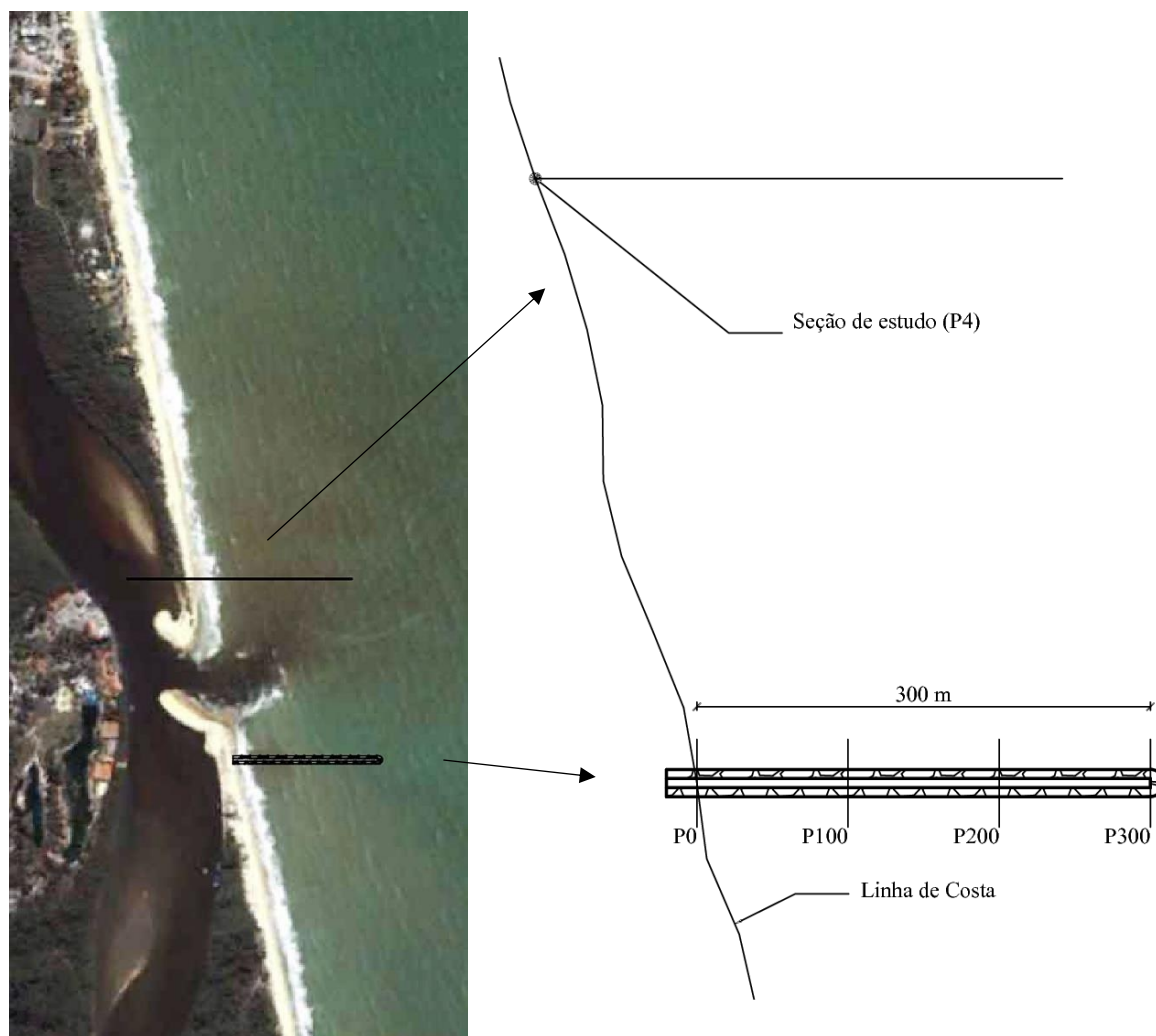
Perante a análise desenvolvida e não se dispondo de valores adequados à realidade do Brasil, para os custos associados às dimensões dos blocos de enrocamento, optou-se pela solução com talude  $H/V = 1/1$ , por ser a que exige um menor volume de material.

Na Figura 33 são apresentados os esquemas (planta e corte) indicativos da solução adotada.





a) Perfil transversal P300, do esporão adotado para a zona de Prado



b) Planta do esporão de 300 m de comprimento, com perfis de 100 em 100 m, localizado 400 m a sul da seção de estudo

Figura 33: Esquema da planta e do corte do esporão selecionado como possível solução na zona de Prado

Como indicado na Figura 33b, o esporão é apresentado por quatro perfis, com uma distância de 100 m entre si, cujo perfil P300 (Figura 33a) representa o perfil transversal tipo ao longo da estrutura de defesa costeira, alterando a cota de fundo consoante a posição do perfil e mantendo a cota de coroamento a 2,30 m.



## **Capítulo 7**

### **CONSIDERAÇÕES FINAIS**



## **7. Considerações Finais**

Nesta seção vão ser apresentadas as observações finais da dissertação, que incluem as principais conclusões que se obtiveram ao longo da realização deste trabalho, bem como certos esclarecimentos em relação ao procedimento efetuado no tratamento de dados e ainda o registo de vários pontos essenciais para a análise da zona costeira neste caso de estudo. São ainda apresentadas propostas para dar continuidade a este trabalho no futuro.

### **7.1. Conclusões**

A erosão costeira é um fenómeno cada vez mais presente nas regiões litorais de todo o mundo, surgindo através de processos erosivos naturais e/ou antropogénicos, sendo que em geral, o impacto e importância no meio envolvente continua a ser subestimado. Apesar deste tema já ser debatido, continua a não ter uma devida atenção a respeito do planeamento e da gestão das zonas costeiras, de modo a evitar mais prejuízos e situações de perigo para as populações que se mantêm próximo das costas, como uma forma de subsistência. Para isso é essencial implementar medidas que previnam impactos significativos no litoral, tendo em conta o meio envolvente a nível ambiental, como a nível económico e social.

No presente trabalho foi possível observar um caso de erosão na costa brasileira (município do Prado, no estado de Bahia), uma das costas mais atingidas por este fenómeno a nível mundial, em consequência das mudanças climáticas, que originam novos fenómenos naturais, e das ações humanas que, desde o tempo colonial, vão permanecendo junto à costa, consoante a evolução dos tempos. Por esse motivo, em qualquer estudo se considera importante efetuar uma caracterização do local e um estudo do desenvolvimento populacional, de forma a perceber a influência que cada um destes fatores tem sobre as alterações ocorridas na linha de costa.

Dentro da caracterização do local, foram estudadas as atividades económicas e sociais e a geomorfologia da região, que em conjunto se destacaram como a forma de subsistência do município de Prado, através do cultivo e do turismo, nomeadamente com o aproveitamento de recursos relacionados com as praias. No entanto, com o recuo da linha de costa e a abundância de falésias, este tipo de atividade vai ser conduzido à escassez e a uma consequente perda económica do local, abrangendo diversos prejuízos relacionados com a

população e com os ecossistemas envolventes, que também vão sofrendo alterações, podendo causar potenciais impactos provenientes dessas modificações.

Na região de Prado, o rio Jucuruçu sofreu grandes alterações ao longo dos tempos, sendo um elemento de sobrevivência para a população e também de exploração colonial, devastando diversos ecossistemas presentes nas margens do rio. A destruição de ecossistemas originou grandes impactos referentes a assoreamentos dos solos e à perda de biodiversidade, que interligadas, funcionam como uma barreira de proteção contra às ações naturais, como por exemplo as marés. Atualmente, no local de rutura, permanece pouca vegetação, tal como a vegetação de restinga e de mangues, que por vezes, funcionavam como fixadoras dos terrenos. No entanto, devido às ações humanas, tais como a exploração dos solos e a construção de infraestruturas, esse ecossistema entrou em desequilíbrio, levando talvez à degradação da zona em questão. Nesta perspectiva, é possível afirmar que o problema de erosão na costa de Prado está sob influência de diversos fatores, englobando condições naturais e/ou antropogénicas, sendo assim mais complexo perceber a causa deste fenómeno. Considera-se também que é essencial continuar a efetuar estudos mais pormenorizados do local.

Para além disso, a caracterização da agitação marítima também é um dos elementos mais importantes para se poder avaliar soluções para este tipo de problema. Para tal, foram recolhidos dados referentes às ondas e às marés do litoral em estudo, havendo alguma dificuldade em obter essa informação em valores representativos. Verificou-se a ausência de monitorização da variação da linha de costa, do clima de ondas e do nível do mar, tornando-se difícil a distinção entre eventos e tendências. A falta de informação obrigou a uma estipulação de parâmetros, tendo em conta os valores mais plausíveis para a zona em questão, o que originou incertezas na preparação do modelo numérico utilizado para representar a zona de estudo. Independentemente das incertezas, foi definido um cenário base fundamentado de acordo com esses parâmetros, o que permitiu simular diversos cenários de intervenção, tendo em conta as condições do local de estudo.

Após a definição do cenário base, considerado cenário de referência, foram simulados diversos cenários de intervenção com recurso a estruturas de defesa costeira, a partir do modelo LTC. A interpretação dos resultados obtidos para cada cenário permitiu definir uma intervenção.

A solução escolhida correspondeu a um esporão de 300 m, localizado 400 m a sul do local onde ocorreu a rotura de linha de costa. Esta solução beneficia o local pretendido, mas tem impactos negativos na zona envolvente, onde a erosão é antecipada.

Definida a intervenção através do esporão, procedeu-se ao dimensionamento prévio da seção transversal da obra, considerando um pré-dimensionamento. Foi definido o tipo de material a utilizar, tendo como objetivo demonstrar uma solução baseada num estudo preliminar, considerando os vários elementos necessários para o dimensionamento de uma estrutura de defesa costeira. Devido à escassez de informação e à impossibilidade de executar um estudo mais elaborado, a presente dissertação mostra uma representação de uma possível obra costeira, capaz de mitigar o problema de erosão, sendo necessário recorrer ainda a ensaios e análises mais aprofundadas dos efeitos indiretos, de modo a apresentar uma solução definitiva.

## **7.2. Desenvolvimentos Futuros**

Para um caso de estudo como o que foi apresentado ao longo desta dissertação, seria fundamental recorrer a outras ferramentas, de forma a poder efetuar um estudo rigoroso e completo, englobando registos e medições de cada fator influente no problema de erosão.

Como referido, foi realizado um estudo preliminar deste caso, localizado em Prado, o que originou uma dificuldade na recolha de dados mais representativos e característicos da zona, e, portanto, para um desenvolvimento futuro é necessário efetuar diversas medições e registos de todos os fatores que possam influenciar o processo de erosão através de um plano de monitorização completo e extenso. Assim sendo, a recolha de informação sobre este assunto abrange vários temas relacionados com o rio e respetiva bacia hidrográfica (variação de caudais sólidos fluviais), o oceano (séries longas de registos da agitação) e a população existente no local, sendo estes componentes descritos de seguida, de forma mais completa.

De modo a entender o processo de erosão, é essencial estudar o comportamento de quaisquer sistemas envolventes à zona de estudo, que, neste caso, engloba o rio Jucuruçu e o Oceano Atlântico. Por exemplo, em relação ao rio, tem de ser recolhidas informações de componentes que possam ter alterado o comportamento do rio e/ou da respetiva bacia hidrográfica, tendo em conta todas as ações humanas e naturais, de modo a explicar a

redução da disponibilidade de sedimentos no litoral. Para tal, deve haver uma pesquisa sobre possíveis obras hidráulicas construídas na zona (ex.: barragens), os caudais sólidos transportados ao longo do curso do rio, a influência da pluviometria sob a região, medidas adotadas em casos de emergência ou de aproveitamento de recursos das margens do rio, entre outras. Devem também ser considerados todos os elementos que tenham impacto indireto sobre as alterações do comportamento do rio, pois podem existir interligações provenientes destes e, portanto, não devem ser ignorados quaisquer componentes até serem refutados.

Relativamente ao Oceano Atlântico, este implica o estudo da linha de costa em função da caracterização da agitação marítima, da variabilidade da posição da linha de costa ao longo dos tempos e o impacto populacional sobre a zona costeira do Prado. A caracterização do clima de agitação marítima permite conhecer a influência que as marés e as ondas têm sob o litoral, sobre a dinâmica sedimentar e a variabilidade da posição da linha de costa, sendo necessário realizar uma análise rigorosa para a determinação da solução mais adequada.

Para tal, além da recolha de dados relacionado com a agitação marítima, deve haver também uma avaliação do comportamento da linha de costa em regiões próximas à de estudo, incluindo a avaliação do impacto da construção de obras de defesa costeira ou de outro tipo e a existência de possíveis problemas de erosão e as medidas aplicadas. No intuito de solucionar o processo de erosão em algumas zonas, as medidas adotadas acabam por causar potenciais impactos nas zonas vizinhas, antecipando ou agravando situações de erosão. Além destas construções, e visto ser uma zona turística, existem outros tipos de infraestruturas que muitas vezes podem influenciar o comportamento da linha de costa devido às ações não-naturais a que é submetida, desequilibrando o ecossistema presente.

Pode também dirigir-se o estudo do local para as populações, que têm vindo a modificar o litoral na evolução dos tempos, causando também grandes impactos na região. Assim sendo, devem ser estudadas as modificações da costa de Prado em relação à exploração a que foi sujeita, comparando com registos antigos e recentes através da perspetiva da população, o que permite uma visão diferente sobre as causas que levaram a este processo de erosão da zona. Muitas das populações permanecem nas zonas costeiras como uma forma de subsistência e, portanto, são dos elementos mais interessados na preservação e reabilitação dos litorais, sendo por isso também essencial recolher as opiniões da população no que refere



às soluções consideradas mais adequadas para o problema. Estas opiniões, ao serem levadas em consideração, fazem com que a implementação das medidas a adotar seja menos difícil, promovendo uma gestão participada do litoral.

Face à análise desenvolvida neste trabalho pode-se concluir que muitos dos fatores que influenciam a erosão costeira estão interligados, o que implica que o procedimento de resolução deste tipo de problema é complexo e deve ser bastante pormenorizado, de modo a definir uma solução para o local em questão que seja duradoura e não cause potenciais impactos negativos nas zonas vizinhas, agravando mais situações de erosão noutras regiões.

Na realização deste trabalho foi realçada a importância de um estudo pormenorizado sobre as zonas costeiras, o que permitiu perceber os diferentes comportamentos do litoral, não havendo assim uma solução única para o frequente problema de erosão. Por esse motivo, mais uma vez se salienta a importância do planeamento e gestão das zonas costeiras, sendo uma das ferramentas para a preservação do litoral, impedindo o agravamento do processo natural e/ou antropogénico de erosão, sempre com o intuito de proteger as populações e os ecossistemas envolventes nas regiões afetadas.



## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**



## Referências Bibliográficas

**Amorim, R. (2016).** A Representação de Mapas de Paisagens na Escala Regional: O Exemplo da Região Costa do Descobrimento (Bahia). *Revista da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Geografia (ANPEGE)*, vol. 12, nº 17, pp 257-292.

**ANA (2017).** Agência Nacional de Águas. <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>. Última visualização: novembro de 2017.

**Atlas Brasil (2013).** Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil. <http://atlasbrasil.org.br/2013/>. Última Visualização: novembro de 2017.

**Boas, G., Silva, E., Nunes, F. (2011).** Grupo Barreiras: Características, Gênese e Evidências de Neotectonismo. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*, Rio de Janeiro: Embrapa Solos, ISSN 1678-0892:194, 30p.

**BRASIL (1987).** Folha SE.24 Rio Doce: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra. *Levantamento de Recursos Naturais*, vol. 34, 550p, IBGE, Rio de Janeiro.

**Campos, R. (2017).** Planícies Costeiras. Curso de Oceanografia, Universidade Federal da Bahia. <http://www.zonacosteira.bio.ufba.br/>. Última visualização: novembro de 2017.

**Campos, R. (2017).** Restinga. Curso de Oceanografia, Universidade Federal da Bahia. <http://www.zonacosteira.bio.ufba.br/>. Última visualização: junho de 2018.

**CBPM/CPRM (2000).** Avaliação da Potencialidade Mineral e Subsídios Ambientais para o Desenvolvimento Sustentável dos Municípios de Belmonte, Santa Cruz Cabrália, Porto Seguro e Prado. Companhia Baiana de Pesquisa Mineral (CBPM)/Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Projeto Costa do Descobrimento, Programa de Avaliação de Potencialidades Minerais (PAPM), Salvador, Bahia, 163p.

**Ceccarelli, T. (2009).** Paradigmas para os Projetos de Obras Marítimas no Contexto das Mudanças Climáticas. Tese de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 125p.

**CEMIG (2017).** Bacias do Leste. Programa Peixe Vivo, Companhia Energética de Minas Gerais. <http://www.cemig.com.br>. Última visualização: novembro de 2017.

**CEPLAC (1976).** Diagnóstico socio-económico da região cacauzeira. Comissão Executiva do Plano de Lavoura Cacaueira, Recursos Hídricos, vol. 5, 133p., Ilhéus, Bahia, Brasil.

**CHM (2018).** Cartas Náuticas. Centro de Hidrografia da Marinha, Marinha do Brasil. <https://www.marinha.mil.br/chm/>. Última visualização: janeiro de 2018

**CIRIA, C. C. (2007).** The Rock Manual. The Use of Rock in Hydraulic Engineering (2nd Edition). Chapter V - Physical Processes and Design Tools, C683, CIRIA, Londres, pp. 487-756.

**Coelho, C. (2005).** Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira. Tese de Doutorado, Universidade de Aveiro, 440p.

**Coelho, C., Silva, R., Veloso-Gomes, F., Taveira-Pinto, F. (2006).** Modelos de Previsão da Evolução da Configuração Costeira. 1<sup>as</sup> Jornadas de Hidráulica Recursos Hídricos e Ambiente, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pp 17-25.

**Coelho, C., Lima, M. (2017).** O modelo de evolução da linha de costa LTC: pressupostos, evolução, validação e aplicação. Revista da Gestão Costeira Integrada, 17p.

**Felgueiras, G. (2015).** Comportamento de Mantos de Estruturas Portuárias com Blocos Cúbicos, em Betão, de Diferentes Pesos Volúmicos. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 67p.

**FEMAR (2001).** Manguezais. Educar para Proteger. Fundação de Estudos do Mar, Cooperação Técnica Brasil-Alemanha, Projeto PLANÁGUA SEMADS/GTZ, Rio de Janeiro, 97p.

**GOSS-BRASIL (2017).** Rede de ondas. Programa GOOS/BRASIL. <http://www.goosbrasil.org/>. Última visualização: novembro de 2017.

**Guimarães, B. (2012).** Erosão Costeira e Produção de Blocos para Obras de Proteção com Enrocamento. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 111p.

**IBGE (2010).** Censo de 2010. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. <https://cidades.ibge.gov.br/>. Última Visualização: novembro de 2017.

**IBGE (2011).** Atlas geográfico das zonas Costeiras e oceânicas do Brasil. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, 177p.

**IBGE (2016).** Censo de 2016. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. <https://cidades.ibge.gov.br/>. Última Visualização: novembro de 2017.

**Irmãos Cavaco (2006-2008).** Reabilitação dos Esporões e das Defesas Aderentes de Esmoriz, de Cortegaça e do Furadouro. <http://www.icsa.pt>. Última visualização: junho de 2018.

**Jornal Alerta (2017).** Prado. <https://jornalalerta.com.br>. Última visualização: junho de 2018.

**Kamphuis, J. K., Davies, M. H., Nairn, R. B., Sayao, O. J. (1986).** Calculation of Littoral Sand Transport Rate. Coastal Engineering, Nº 10, pp. 1-21. Citado por Lima, M. (2018)

**Lima, M. (2011).** Programação de Métodos de Pré-dimensionamento de Obras Costeiras. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 166p.

**Lima, M., Coelho, C., Cachim, P. (2011).** Programação de Métodos de Pré-Dimensionamento de Obras de Defesa Costeira. 7as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, 6 e 7 de outubro, Comunicação 26, Porto, Portugal, 18 p.

**Lima, M. (2018).** Ferramenta numérica da análise do impacto de intervenções de defesa costeira na evolução da linha de costa: custos e benefícios. Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, 336p.

**Marinho, B. (2013).** Procedimentos no Estudo de Obras de Defesa Costeira. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 181p.

**McCowan (1891).** “On the Solitary Wave,” Philosophical Magazine, 5th Series, Vol 36, pp 430-437. Citado por Smith (2003).

**Muehe, D., Nicolodi, J. (2017).** Geomorfologia. Macrodiagnóstico da Zona Costeira e Marinha do Brasil, Laboratório de Gestão do Território (Laget), pp 23-39.

- Natureza da Bahia (2011).** Rio Jucuruçu. <http://naturezadabahia.blogspot.com>. Última visualização: junho de 2018
- Netto, A. (2008).** Modificações da Zona Costeira do extremo Sul da Bahia nos últimos 150 anos, e a sua Relação com a Sedimentação do Banco de Abrolhos. Tese de Doutorado, Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, Salvador, 201p.
- Neves, C., Muehe, D. (2008).** Vulnerabilidade, impactos e adaptação a mudanças do clima: a zona costeira. Parcerias Estratégicas, nº 27, Brasília, DF
- Neves, J. (2013).** Quebramares Portugueses (Madeira e Porto Santo). Inventário e Análise Comparativa de Soluções. Tese de Mestrado, Universidade da Madeira, 222p.
- Oliveira, W. (2013).** Vidas ao Acaso. São Paulo: Baraúna, 226p.
- Pita, C. (1986).** Dimensionamento Hidráulico do Manto Resistente de Quebra-Mares de Talude. Memória nº 670, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 68p. Citado por Marinho, B. (2013).
- Prado Turismo (2015).** Manguezal e Rio Jucuruçu. <http://www.pradoturismo.com.br>. Última visualização: junho de 2018.
- Praias da Bahia (2018).** Guia Geográfico: Praias da Bahia. Prado. <http://www.praias-bahia.com/>. Última visualização: junho de 2018.
- RBRH (1999).** Uma formulação explícita para a solução de escoamentos em águas rasas. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Volume 4, n.4, pp 63-73. Citado por Marinho, B. (2013)
- RGCI (2017).** Glossário da Revista de Gestão Costeira Integrada. <http://www.aprh.pt/rgci>. Última Visualização a: novembro de 2017.
- Rosseti, V. (2017).** Caracterização de Restingas e Manguezais. NetNature. <https://netnature.wordpress.com/>. Última visualização: novembro de 2017
- Santos, A. (2006).** Diagnóstico das Condições Geoambientais da Orla Marítima da Costa das Baleias, Extremo Sul do Estado da Bahia. Tese de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, Salvador, 152p.
- Sarmiento-Soares, L., Mazzoni, R., Martins-Pinheiro, R. (2009).** A fauna de peixes na baía do Rio Jucuruçu, leste de Minas Gerais e extremo Sul da Bahia. Pan-American Journal of Aquatic Sciences (PANAMJAS), pp 193-207.
- Smith, J. (2003).** Surf Zone Hydrodynamics. Coastal Engineering Manual, Part II: Design of Coastal Project Elements, Chapter 4, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 22 p.
- SPM (1984).** Shore Protection Manual. 4th ed., 2 Vol, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
- Taveira-Pinto, F. (2001).** Análise das Oscilações e dos Campos de Velocidades nas proximidades de Quebramares Submersos sob a Ação da Agitação Marítima. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 351 p. Citado por Marinho, B. (2013).

**Taveira-Pinto, F., Neves, A. (2003).** A Importância da Consideração do Carácter Irregular da Agitação Marítima no Dimensionamento de Quebramares de Taludes, nº16, pp 95-111. Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.

**Wikiparques (2018).** 5 parques para conhecer a Bahia. Parque Nacional do Descobrimento. <http://www.wikiparques.org>. Última visualização: junho de 2018.

**Wikipédia (2006).** Prado (Bahia). <https://pt.wikipedia.org>. Última visualização: novembro de 2017.



